

RAMON AMARO DE SALES

**MODELAGEM DE BASE PROCESSUAL APLICADA AO CRESCIMENTO E
PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Júlio César Lima Neves

Coorientador: Elvis Felipe Elli

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus**

T

S163m
2023 Sales, Ramon Amaro de, 1992-
Modelagem de base processual aplicada ao crescimento e
produtividade do eucalipto: / Ramon Amaro de Sales. - Viçosa, MG,
2023.
1 tese eletrônica (97 f.): il. (algumas color.).
Orientador: Júlio César Lima Neves
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento
de Fitotecnia, 2023.
Inclui bibliografia.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.010>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Crescimento - Métodos de simulação; 2. Eucalipto -
Cultivo - Minas Gerais; 3. Meteorologia agrícola; I. Neves, Júlio César
Lima II. Universidade Federal de Viçosa.. Departamento de Fitotecnia.
Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia III. Título

CDD 22. ed. 634.973766

Bibliotecário(a) responsável: BRUNA SILVA CRB-6/2552


RAMON AMARO DE SALES

**MODELAGEM DE BASE PROCESSUAL APLICADA AO CRESCIMENTO E
PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO**


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 22 de agosto de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **RAMON AMARO DE SALES**
Data: 16/01/2024 18:13:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ramon Amaro de Sales
Autor

Documento assinado digitalmente
 **JULIO CESAR LIMA NEVES**
Data: 17/01/2024 05:36:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Júlio César Lima Neves
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, cuja presença foi minha luz nos momentos mais desafiadores desta jornada. Sua orientação constante e infinita me fortaleceu, fornecendo as forças necessárias para persistir e superar os obstáculos que surgiram ao longo do caminho. Sem Ele, minha trajetória não teria sido possível, e sou profundamente grato por isso.

Agradeço à minha família e à minha noiva Bruna Leonardi Tetzner, pelo apoio incondicional ao longo deste percurso acadêmico, seu amor, encorajamento e compreensão foram pilares fundamentais para que eu pudesse superar os desafios e perseverar até o fim.

Ao meu orientador (Júlio César Lima Neves) e coorientador (Elvis Felipe Elli), pelas orientações valiosas, paciência e dedicação ao longo deste trabalho. Seus conhecimentos e insights foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese. Sem vocês, nada disso seria possível.

Aos membros da banca examinadora [Evandro Chaves de Oliveira, Samuel Cordeiro Vitor Martins e Helio Garcia Leite], por dedicarem seu tempo e expertise para avaliar este trabalho e fornecer sugestões construtivas. Suas contribuições foram inestimáveis para aprimorar minha pesquisa.

Ao departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa que me concedeu a oportunidade de realizar este doutorado. Agradeço pelo suporte financeiro, infraestrutura e recursos disponibilizados, que foram essenciais para a realização deste estudo.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento desta tese, mesmo que não mencionados nominalmente. Seu apoio, incentivo e contribuições indiretas foram igualmente valiosos.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) (Código de Financiamento 001).

RESUMO

SALES, Ramon Amaro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Modelagem de base processual aplicada ao crescimento e produtividade do eucalipto**. Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientador: Elvis Felipe Elli.

O eucalipto é a espécie mais abundante nas plantações florestais do Brasil. A alta produtividade do eucalipto é resultado do uso de materiais genéticos adaptados e melhores práticas de manejo. No entanto, devido à diversidade de condições de sítio em que o eucalipto é cultivado no Brasil, existe uma diferença entre a produtividade alcançada no campo e seu potencial máximo. O objetivo deste estudo foi calibrar e validar os modelos de simulação 3-PG e APSIM *Next Generation Eucalyptus* para entender as quebras de rendimento bem como avaliar a sensibilidade da produtividade do eucalipto em Minas Gerais, Brasil. Os modelos 3-PG e APSIM foram calibrados e avaliados, utilizando-se dados experimentais de produtividade do eucalipto em diferentes regiões produtoras de Minas Gerais. Ambos os modelos apresentaram bom desempenho na simulação de diferentes condições climáticas, solos e genótipos. O APSIM mostrou-se mais eficaz na simulação de uma cultura genérica e em condições contrastantes. Além disso, a deficiência hídrica foi identificada como o principal fator de perda de produtividade, destacando a necessidade de clones mais tolerantes à seca e ajustes no manejo florestal. Em relação à sensibilidade dos modelos, para simular a produtividade em diferentes regiões, tanto o 3-PG quanto o APSIM responderam positivamente ao aumento da disponibilidade de água no solo. O APSIM demonstrou maior sensibilidade e houve variação na produtividade de acordo com a disponibilidade hídrica do solo. Estes modelos podem ser aprimorados, como por exemplo usando classes de solo no APSIM, ou mesmo uma distribuição vertical do sistema radicular em ambos os modelos, para melhorar a dinâmica de água e absorção pelas plantas.

Palavras-chave: Apsim, 3-PG, Simulação, Eucalipto, Modelagem, Agrometeorologia, Quebra de produção, Sensibilidade.

ABSTRACT

SALES, Ramon Amaro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2023. **Process-based modeling applied to the growth and productivity of eucalyptus**. Advisor: Júlio César Lima Neves. Co-Advisor: Elvis Felipe Elli.

Eucalyptus is the most abundant species in forest plantations in Brazil. The high productivity of eucalyptus is the result of the use of adapted genetic materials and best management practices. However, due to the diversity of site conditions in which eucalyptus is cultivated in Brazil, there is a difference between the productivity achieved in the field and its maximum potential. The objective of this study was to calibrate and validate the 3-PG and APSIM Next Generation Eucalyptus simulation models to understand yield losses and assess the sensitivity of eucalyptus productivity in Minas Gerais, Brazil. The 3-PG and APSIM models were calibrated and evaluated using experimental eucalyptus productivity data from different producing regions in Minas Gerais. Both models showed good performance in simulating different climatic conditions, soils, and genotypes. APSIM proved to be more effective in simulating a generic crop under contrasting conditions. Additionally, water deficiency was identified as the main factor causing productivity loss, emphasizing the need for more drought-tolerant clones and adjustments in forest management. Regarding the sensitivity of the models to simulate productivity in different regions, both 3-PG and APSIM responded positively to an increase in soil water availability. APSIM showed greater sensitivity, and there was variation in productivity according to the soil water availability. These models can be improved, for example, by using soil classes in APSIM, or even a vertical distribution of the root system in both models, to enhance water dynamics and absorption by plants.

Keywords: Apsim, 3-PG, Simulation, Eucalyptus, Modeling, Agrometeorology, Yield gap, Sensitivity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	9
2	REFERÊNCIAS	14
3	HIPÓTESES	19
	ARTIGO I.....	20
	COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS E DESEMPENHO ENTRE OS MODELOS APSIM <i>NEXT GENERATION</i> E 3-PG PARA A CULTURA DO <i>EUCALYPTUS</i>	20
	RESUMO	20
1	INTRODUÇÃO.....	21
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
2.1	Visão geral do modelo APSIM <i>Next Generation Eucalyptus</i>	23
2.2	Visão geral do modelo 3-PG	23
2.3	Descrição do site experimental.....	24
2.4	Descrição dos tratamentos	25
2.5	Parâmetros do solo e variáveis analisadas.....	27
2.6	Análise dos dados	29
3	RESULTADOS	32
3.1	Calibração do modelo.....	32
3.2	Desempenho dos modelos 3-PG e APSIM <i>Next Generation Eucalyptus</i> na fase de validação.....	38
3.3	Desempenho dos modelos APSIM <i>Next Generation</i> e 3-PG avaliando individualmente os genótipos de <i>Eucalyptus</i>	39
3.4	Crescimento do volume de tronco e IMA ao longo do ciclo do <i>Eucalyptus</i>	40
4	DISCUSSÃO.....	45
5	CONCLUSÃO.....	49
6	REFERÊNCIAS	50

ARTIGO II	59
AVALIAÇÃO DO <i>YIELD GAP</i> PARA A CULTURA DO EUCALIPTO EM REGIÕES DE MINAS GERAIS, BRASIL	59
RESUMO	59
1 INTRODUÇÃO.....	60
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	62
2.1 Local de estudo.....	62
2.2 Dados meteorológicos e do solo.....	63
2.3 Estimativa de rendimento atingível (Y_a) e potencial (Y_p).....	64
2.4 Yield Gaps do eucalipto e eficiência climática	64
3 RESULTADOS	65
3.1 Rendimento do eucalipto e gaps relacionado ao manejo e estresse hídrico	65
3.2 Magnitudes de crescimento, gap's de crescimento e eficiências climática e de manejo do eucalipto em duas épocas de avaliação	65
4 DISCUSSÃO.....	71
5 CONCLUSÃO.....	73
6 REFERÊNCIAS	74
ARTIGO III.....	77
SENSIBILIDADE DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO 3-PG E APSIM PARA EUCALIPTO EM CENÁRIOS CONTRASTANTES DE SOLO	77
RESUMO	77
1 INTRODUÇÃO.....	78
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	80
2.1 Sites e clima.....	80
2.2 Modelos de simulação APSIM e 3-PG.....	82
2.3 Sensibilidade do solo.....	83
2.4 Análise de dados.....	84

3	RESULTADOS	85
3.1	Efeito da classe de solo na produtividade do eucalipto	85
3.2	Efeito da CAD na produtividade do eucalipto	87
4	DISCUSSÃO	90
5	CONCLUSÃO	93
6	REFERÊNCIAS	94
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do eucalipto (*Eucalyptus*) no Brasil apresenta grande importância econômica, ambiental e social, devido à sua posição de destaque entre as espécies florestais. Atualmente, essa espécie vem sendo plantada para a produção de madeira e de matéria-prima para papel, celulose, carvão, aglomerado, serraria, óleos para indústrias farmacêuticas, entre outros (Mendes et al., 2009; Carrillo et al., 2017; Sette et al., 2018; Bobis et al., 2020). Por esse motivo, o incentivo ao plantio florestal é considerado uma das principais estratégias para reduzir o desmatamento de florestas nativas, principalmente onde as florestas fornecem madeira para energia e também para a indústria madeireira (Jürgensen et al., 2014, Payn et al., 2015).

As plantações florestais cobrem 7,8 milhões de hectares no Brasil, e o eucalipto é o gênero de árvore mais abundante nessas plantações, cobrindo 5,7 milhões de hectares, valor esse correspondente a aproximadamente 73% da área total de florestas plantadas (IBÁ, 2019). Isso contribui para o Brasil ser o maior produtor mundial de eucaliptos, apresentando ainda produtividade, expressa pelo incremento médio anual de madeira do tronco (IMA), de aproximadamente $36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (IBÁ, 2019; Elli et al., 2020a), em média, havendo áreas com $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Essas altas produtividades são resultado da utilização de materiais genéticos bem adaptados e da implementação de melhores práticas de manejo. Isso inclui o preparo adequado do solo, fertilização adequada, espaçamentos adequados, uso de mudas de alta qualidade e adoção de um controle integrado de ervas daninhas, pragas e doenças (Stape et al., 2001; Stape et al., 2010; Londero et al., 2012; Melo et al., 2016; Gonçalves et al., 2017).

O plantio de eucalipto no Brasil tem se estendido para regiões além daquelas tradicionais, como a Sul e Sudeste do país (Santana et al., 2008), sendo cultivado, portanto, nas mais diferentes condições de sítio florestal. O sítio é definido como uma área com capacidade de produzir florestas ou outra vegetação, sob a combinação de condições biológicas, climáticas e edáficas (Davis, 1966; Clutter et al., 1983). Para Spurr (1952), a qualidade do sítio é a soma total dos fatores edáficos, biológicos e climáticos que afetam as plantas, em que o sítio não é um fator, nem todos os fatores, mas a soma dos fatores efetivos entre os quais um ou mais são dominantes. Portanto, a qualidade do sítio florestal, aliada ao material genético e ao manejo aplicado nos plantios florestais, é o que determinará a produtividade florestal.

Devido à grande diversidade de condições de sítio em que o eucalipto é cultivado no Brasil, a existência de uma quebra de rendimento (*yield gap*) entre os resultados alcançados nas práticas de campo, bem como seu potencial máximo, se torna evidente. Portanto, além da utilização de modelos para estimar o crescimento e a produtividade dos povoamentos de eucalipto, é de suma importância desenvolver ferramentas que possam quantificar esse *yield gap* e, conseqüentemente, planejar o desenvolvimento desses plantios florestais. Essas ferramentas desempenham um papel crucial na melhoria da segurança do cultivo do eucalipto e, por conseguinte, na maximização de sua rentabilidade.

O *yield gap* do eucalipto refere-se à diferença entre o potencial máximo de produção da cultura e a produtividade real obtida em campo (Van Ittersum & Rabbinge, 1997; Lobell et al., 2009; Elli et al. 2019). Essa lacuna pode ser influenciada por uma série de fatores, como práticas de manejo inadequadas, limitações genéticas, condições edafoclimáticas desfavoráveis e deficiências no sistema de produção (Woittiez et al., 2017; Elli et al. 2019; Freitas et al., 2021). Compreender e reduzir o *yield gap* é de extrema importância, pois representa uma oportunidade para aumentar a eficiência produtiva e a rentabilidade dos plantios florestais de eucalipto. Identificar as principais causas desse *gap*, e desenvolver estratégias para minimizá-lo, contribui para otimizar o manejo da cultura, maximizar o uso dos recursos disponíveis e alcançar um melhor aproveitamento do potencial produtivo do eucalipto. Além disso, a redução do *yield gap* tem implicações significativas do ponto de vista econômico, ambiental e social, ao promover uma produção mais sustentável e resiliente no setor florestal.

Tradicionalmente, os modelos de crescimento e produção baseados em mensuração têm sido as principais ferramentas de modelagem aplicadas aos sistemas de manejo florestal (Soares et al., 2005; Borges et al., 2012). Dentre os modelos baseados em processos idealizados para estimar a produtividade de povoamentos florestais, o modelo 3-PG, acrônimo de *Physiological Principles in Predicting Growth* (Landsberg & Waring, 1997), tem obtido destaque, sendo muito utilizado no Brasil.

O modelo 3-PG utiliza um agrupamento de conceitos como a eficiência de uso de radiação, partição de C e parâmetros nutricionais do povoamento florestal (Gupta & Sharma, 2019). Os valores desses parâmetros são obtidos por medidas diretas ou por estudos disponíveis sobre as espécies a serem parametrizadas (Landsberg & Waring, 1997; Xenakis et al., 2008). O modelo 3-PG é um modelo determinístico, que calcula processos fisiológicos como fotossíntese, transpiração, partição de biomassa para partes de árvores e produção de serapilheira (Coops et al., 2011). Ele é uma combinação de relações empíricas e processos

fisiológicos, calculados a partir de medidas experimentais e cálculos de campo (Gupta & Sharma, 2019). Assim, facilita e reduz tanto os dados em termos de quantidade, como a complexidade nas etapas de cálculo dos dados (Silva et al., 2013).

O modelo 3-PG foi aplicado a várias espécies florestais em diferentes países, como Austrália, Canadá, Espanha, China, Brasil e México (Coops et al., 2011; Song et al., 2013; González-García et al., 2016; Xie et al., 2017; Caldeira et al., 2020; Guevara-Escobar et al., 2020). Esse modelo tem sido aplicado na avaliação do crescimento e produtividade do eucalipto (Borges et al., 2012; Guevara-Escobar et al., 2020), teca (Pontes, 2011), pinhos (Gonzalez-Benecke et al., 2016; Stahring, 2017) e outras espécies florestais.

Apesar do modelo 3-PG apresentar bons resultados na simulação da produtividade de povoamentos de eucalipto, este modelo hoje é fortemente influenciado por variáveis climáticas, possuindo baixa sensibilidade às diferentes unidades de manejo e/ou classes de solo, sendo, no entanto, bastante responsivo à fertilidade do solo (Borges, 2012). De acordo com Esprey et al. (2004), o modelo 3-PG é altamente sensível à razão da produção primária líquida para a bruta, eficiência quântica do dossel, condutância do dossel e densidade básica da madeira, e moderadamente sensível à partição da raiz, efeitos da fertilidade na eficiência quântica do dossel e coeficiente de extinção de luz.

O 3-PG, em relação ao solo, trata melhor o efeito do nível de fertilidade do solo, mediante um modificador de fertilidade (FR) na escala de 0 a 1, onde 1 é uma situação de plena fertilidade e 0 uma situação de fertilidade plenamente limitante. A variável de entrada FR no 3-PG afeta o índice de área foliar e, portanto, a radiação fotossinteticamente ativa, a eficiência do uso da luz do dossel e a condutância do dossel (Subedi & Fox, 2016). Ela também está diretamente envolvida na alocação de C para os componentes subterrâneos, onde FR mais alto leva a menor alocação de C para raízes (Landsberg et al., 2011; Subedi et al., 2015).

Em trabalho desenvolvido por Menezes (2005), foi possível observar que dentro de uma mesma área (mesmo núcleo florestal) com variação na tipologia do solo, o 3-PG modifica ligeiramente suas estimativas, enquanto que o inventário florestal mostra grandes diferenças de produtividade. Isso pode ser comprovado pelos baixos valores de coeficiente de variação para a produtividade simulada no 3-PG, quando há variação no solo, visto que os dados obtidos pelo inventário, que indica a realidade, mostram uma variabilidade muito maior no coeficiente de variação para a produtividade (Menezes, 2005).

A baixa sensibilidade do modelo 3-PG quanto ao solo, exceção feita para o FR, aponta para a necessidade de conferir ao modelo maior e melhor resolução em nível de solo, para sua

aplicação bem-sucedida não apenas no planejamento, mas, também, para subsidiar o manejo florestal.

Na tentativa de conferir resolução em nível de solo ao modelo 3-PG, Neves et al. (2008) propuseram um modulador pedológico baseado em características mais estáveis do solo. Foram utilizadas a matéria orgânica, a densidade do solo, a capacidade de água disponível do solo (CAD) e um índice de fixação de P pelo solo (P-rem). Por sua vez, a CAD integra a textura e a profundidade do perfil de solo explorado pelas raízes. Em versão mais recente desse modulador, desenvolvida também por Neves¹, foi excluído desse modulador o índice de fixação de P pelo solo. Esse modulador pedológico tem sido utilizado, de modo multiplicativo, às estimativas de produtividade fornecidas pelo 3-PG.

Buscando o desenvolvimento de um modulador edáfico que reflita os efeitos do solo sobre os fluxos de água e nutrientes para uso no 3-PG, Borges (2012) utilizou dados de análise foliar, visto que os teores de nutrientes na folha, além de refletirem os fluxos de água e nutrientes no solo, apresentam correlação com o crescimento e a produção das plantas. A proposta desse autor foi a obtenção do modulador edáfico que permite avaliar a produtividade da cultura em resposta ao seu estado nutricional, separando a influência de outros fatores de ordem não nutricional.

Um modelo processual desenvolvido recentemente que vem ganhando notoriedade mundial é o *APSIM Next Generation Eucalyptus* (Holzworth et al., 2018), versão nova do modelo APSIM. O APSIM tem sido usado extensivamente por pesquisadores para avaliar práticas de manejo na fazenda, estratégias de adaptação ao risco/mudança climática, estratégias mistas de pastagem/pecuária, competição de recursos agroflorestais, lixiviação de nutrientes sob várias condições, expressão de características genéticas e muitas outras aplicações (Holzworth et al., 2014). Essa versão do modelo para *Eucalyptus* adota abordagem similar ao módulo planta do modelo 3-PG, mas parece tratar de forma mais adequada o módulo de solo.

O modelo *APSIM Next Generation Eucalyptus* combina a complexidade subterrânea do modelo CABALA, com a simplicidade acima do solo de 3-PG usando tecnologias modernas de *softwares* (Smethurst et al., 2020). Em estudo realizado por Smethurst et al. (2020), utilizando o modelo *APSIM Next Generation Eucalyptus*, os autores concluíram que esse modelo previu satisfatoriamente o crescimento da biomassa acima do solo do eucalipto em uma ampla gama de condições edáficas e de manejo. Neste contexto, o modelo *APSIM Next*

¹ Comunicação pessoal do Prof. Júlio César Lima Neves, Departamento de Solos – Universidade Federal de Viçosa.

Generation Eucalyptus se apresenta como uma alternativa viável tanto em nível de clima como em nível de solo, se tornando uma poderosa ferramenta na modelagem de espécies florestais.

Diversos processos ocorrem na interface solo-planta, como absorção de nutrientes, tornando-o um processo complexo, e sua compreensão requer a integração de conhecimentos de diversos ramos da ciência (Valadares, 2015). As estimativas de produtividade florestal atreladas com as informações fornecidas por modelos matemáticos se torna uma ferramenta útil para obter estimativas da demanda nutricional pelas plantas. Para a obtenção de produtividades mais elevadas e econômicas, sem que haja prejuízos ao equilíbrio ambiental, deve-se visar, portanto, à definição de modelos quantitativos que permitam estimar a demanda por nutrientes, em função do potencial de produção almejado (Kurihara et al., 2013).

Nas últimas décadas, grandes esforços vêm sendo feitos com o intuito de desenvolver modelos conceituais/quantitativos para compreensão e predição dos processos envolvidos no fluxo de nutrientes no solo, sua absorção e utilização pelas plantas (Valadares, 2015). Em estudo desenvolvido por Valadares et al. (2020), foi gerado um conjunto de equações logísticas para prever a eficiência do uso do fósforo (P) e o particionamento em plantas de eucalipto, podendo essas equações serem utilizadas em diferentes modelos que dependem da relação entre P absorvido e produtividade da planta. Também foram desenvolvidos modelos baseados em variáveis de solo, clima e associadas ao povoamento florestal para estimar a alocação e a eficiência de uso do nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) em povoamentos de eucalipto, por meio de equações sigmoidais (Valadares, 2015). As estimativas da demanda nutricional são básicas para, juntamente com os resultados de análise de nutrientes no solo, chegar à recomendação de adubação, fazendo-se para isso o uso da filosofia de balanço nutricional.

Com base nessas considerações inicialmente levantadas, o presente estudo teve como objetivo calibrar e validar os modelos 3-PG e *APSIM Next Generation Eucalyptus* e avaliar os *gaps* de produtividade do eucalipto em diferentes condições de clima, solo, genótipo e manejo florestal em Minas Gerais. Além disso, buscou-se avaliar a sensibilidade do modelo APSIM em relação às propriedades do solo, comparativamente ao modelo 3-PG.

2 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 179-195, 2004.
- BOBIS, O.; MOISE, A. R.; BALLESTEROS, I.; REYES, E. S.; DURÁN, S. S.; SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, J.; ALVAREZ-SUAREZ, J. M. Eucalyptus honey: Quality parameters, chemical composition and health-promoting properties. **Food chemistry**, v. 325, p. 126870, 2020.
- BORGES, J. S. Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto. 70f. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- BORGES, J. S.; NEVES, J. C. L.; LOURENÇO, H. M., BARROS, N. F. D.; DIAS, S. C. M. Parameterization of the 3-PG model for eucalypt in the region of Cerrado in Minas Gerais State. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 567-578, 2012.
- CALDEIRA, D. R. M.; ALVARES, C. A.; CAMPOE, O. C.; HAKAMADA, R. E.; GUERRINI, I. A.; CEGATTA, Í. R.; STAPE, J. L. Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity *Eucalyptus* clone in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 462, p. 117989, 2020.
- CARRILLO, I.; VALENZUELA, S.; ELISSETCHE, J. P. Comparative evaluation of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* wood and fibre quality. **IAWA journal**, v. 38, n. 1, p. 105-116, 2017.
- CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: A quantitative approach**. John Wiley & Sons, Inc., 1983.
- COOPS, N. C., GAULTON, R.; WARING, R. H. Mapping site indices for five Pacific Northwest conifers using a physiologically based model. **Applied Vegetation Science**, v. 14, n. 2, p. 268-276, 2011.
- DAVIS K.P. **Forest management, regulation and valuation**. USA: Mc Graw Hill. n. 2nd ed., 519p., 1966.
- ELLI, E. F., SENTELHAS, P. C., DE FREITAS, C. H., CARNEIRO, R. L., & ALVARES, C. A. Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil—Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, p. 117464, 2019.
- ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, 2020a.
- ESPREY, L. J.; SANDS, P. J.; SMITH, C. W. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 235-250, 2004.

FREITAS, C. H., ELLI, E. F., & SENTELHAS, P. C. On-farm assessment of eucalypt yield gaps—a case study for the producing areas of the state of Minas Gerais, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, n. 10, p. 1659-1673, 2021.

GONÇALVES, J. L.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 169-183, 2017.

GONZALEZ-BENECKE, C. A.; TESKEY, R. O.; MARTIN, T. A.; JOKELA, E. J.; FOX, T. R.; KANE, M. B.; NOORMETS, A. Regional validation and improved parameterization of the 3-PG model for *Pinus taeda* stands. **Forest Ecology and Management**, v. 361, p. 237-256, 2016.

GONZÁLEZ-GARCÍA, M.; ALMEIDA, A. C.; HEVIA, A.; MAJADA, J.; BEADLE, C. Application of a process-based model for predicting the productivity of *Eucalyptus nitens* bioenergy plantations in Spain. **Gcb Bioenergy**, v. 8, n. 1, p. 194-210, 2016.

GUEVARA-ESCOBAR, A.; CERVANTES-JIMÉNEZ, M.; SUZÁN-AZPIRI, H. Uso del modelo 3-PG para la predicción de biomasa de eucalipto en Jalisco, México. **Madera y bosques**, v. 26, n. 1, 2020.

GUPTA, R.; SHARMA, L. K. The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: A review. **Ecological Modelling**, v. 397, p. 55-73, 2019.

HOLZWORTH, D. P.; HUTH, N. I.; DEVOIL, P. G.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; MCLEAN, G.; KEATING, B. A. APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 327-350, 2014.

HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; FAINGES, J.; BROWN, H.; ZURCHER, E.; CICHOTA, R.; SNOW, V. APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. **Environmental Modelling & Software**, v. 103, p. 43-51, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Annual Report 2019. Brasília: IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores, 2019. 80p.

JÜRGENSEN, C.; KOLLERT, Walter; LEBEDYS, A. Assessment of industrial roundwood production from planted forests. **Planted Forests and Trees Working Papers (FAO) eng no. FP/48/E**, 2014.

KURIHARA, C. H.; VENEGAS, V. H. A.; NEVES, J. C. L.; DE NOVAIS, R. F. Accumulation of dry matter and nutrients in soybean, as a variable of the productive potential. **Revista Ceres**, v. 60, p. 690-698, 2013.

LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J.; LANDSBERG, J.; SANDS, P. **Physiological ecology of forest production: principles, processes and models**. London: Elsevier/Academic Press, 2011.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest ecology and management**, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.

LOBELL, D. B., CASSMAN, K. G., & FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual review of environment and resources**, v. 34, p. 179-204, 2009.

LONDERO, E. K.; SCHUMACHER, M. V.; RAMOS, L. O. O.; RAMIRO, G. A.; SZYMCZAK, D. A. Influences of different control periods and coexistence with weed in eucalyptus. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 441-447, 2012.

MELO, E. A. S. C. D.; GONÇALVES, J. L. D. M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R. E.; BAZANI, J. H.; WENZEL, A. V. A.; FERRAZ, A. D. V. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 2, 2015.

MENDES, L. M.; IWAKIRI, S.; MORI, F. A.; JUNIOR, J. B. G.; MENDES, R. F. Eucalyptus urophylla stands wood utilization at two different ages for production of particleboard panels. **Cerne**, v. 15, n. 3, p. 288-294, 2009.

MENEZES, A. A. **Produtividade do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**. 98f. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NEVES, J. C. L., TÓTOLA, M. R., SILVA, I. R., KER, J. C., RIBEIRO, A., BARROS, N. F., NOVAIS, R. F., LEITE, F. P., FONSECA, S. Connecting Soils to Forest Productivity: Getting to the Root of the Issue. **International Conference on Process Controlling Productivity in Tropical Plantations – IUFRO**, Porto Seguro, 2008.

PAYN, T.; CARNUS, J. M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLEY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; WINGFIELD, M. J. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57-67, 2015.

PONTES, M. D. S. (2011). **Parametrização do modelo 3-PG para teca (Tectona grandis Lf) e dos sistemas FERTI-UFV e NUTRI-UFV para subsidiar o seu manejo nutricional**. 89f. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. Biomass estimation of brazilian Eucalypt plantations. **Revista Árvore**, v. 32, p. 697-706, 2008.

SETTE JR, C. R.; HANSTED, A. L. S.; NOVAES, E.; E LIMA, P. A. F.; RODRIGUES, A. C.; SOUZA SANTOS, D. R.; YAMAJI, F. M. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial crops and products**, v. 122, p. 209-213, 2018.

SILVA, W. C. M. D.; RIBEIRO, A.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. D.; LEITE, F. P. Water balance model and eucalyptus growth simulation in the rio doce basin, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, p. 403-412, 2013.

SMETHURST, P. J.; VALADARES, R. V.; HUTH, N. I.; ALMEIDA, A. C.; ELLI, E. F.; NEVES, J. C. Generalized model for plantation production of *Eucalyptus grandis* and hybrids for genotype-site-management applications. **Forest ecology and management**, v. 469, p. 118164, 2020.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, p. 711-718, 2005.

SONG, X.; BRYAN, B. A.; ALMEIDA, A. C.; PAUL, K. I.; ZHAO, G.; REN, Y. Time-dependent sensitivity of a process-based ecological model. **Ecological modelling**, v. 265, p. 114-123, 2013.

SPURR, S.H. Forest inventory. **New York : Ronald Press**, 1952. 476 p.

STAHRRINGER, N. I. (2017). **Parametrização de modelos de produtividade e de balanço nutricional para Pinus e Eucalyptus em Corrientes** – Argentina. 153f. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.

STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M.; GONÇALVES, A. N. Relationships between nursery practices and field performance for Eucalyptus plantations in Brazil. **New Forests**, v. 22, n. 1, p. 19-41, 2001.

SUBEDI, S.; FOX, T. R. Modeling repeated fertilizer response and one-time midrotation fertilizer response in loblolly pine plantations using FR in the 3-PG process model. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 90-99, 2016.

SUBEDI, S.; FOX, T. R.; WYNNE, R. H. Determination of fertility rating (FR) in the 3-PG model for loblolly pine plantations in the southeastern United States based on site index. **Forests**, v. 6, n. 9, p. 3002-3027, 2015.

VALADARES, S. V. **Modelagem da aquisição de fósforo e da eficiência nutricional de eucalipto**. 93f. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

VALADARES, S. V.; NEVES, J. C. L.; LEITE, H. G.; BARROS, N. F.; CROPPER JR, W. P.; GERBER, S. Predicting phosphorus use efficiency and allocation in eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 460, p. 117859, 2020.

VAN ITTERSUM, M. K., & RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field crops research**, v. 52, n. 3, p. 197-208, 1997.

WOITTIEZ, L. S., VAN WIJK, M. T., SLINGERLAND, M., VAN NOORDWIJK, M., & GILLER, K. E. Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. **European Journal of Agronomy**, v. 83, p. 57-77, 2017.

XENAKIS, G.; RAY, D.; MENCUCCINI, M. Sensitivity and uncertainty analysis from a coupled 3-PG and soil organic matter decomposition model. **ecological modelling**, v. 219, n. 1-2, p. 1-16, 2008.

XIE, Y.; WANG, H.; LEI, X. Application of the 3-PG model to predict growth of *Larix olgensis* plantations in northeastern China. **Forest Ecology and Management**, v. 406, p. 208-218, 2017.

3 HIPÓTESES

Os modelos de simulação *APSIM Next Generation Eucalyptus* e 3-PG são capazes de prever o crescimento e a produtividade do eucalipto para diferentes condições meteorológicas, tipos de solo e genótipos.

A análise do *yield gap* do eucalipto em diferentes sistemas de cultivo em Minas Gerais permitirá identificar as principais causas que limitam a produtividade, fornecendo *insights* para melhorias na produção.

A avaliação do *yield gap* em plantações de eucalipto em Minas Gerais irá fornecer informações importantes para orientar a tomada de decisões em nível local, permitindo que os agricultores selecionem estratégias adequadas para maximizar a produtividade da cultura.

O modelo *APSIM Next Generation Eucalyptus* tem a concepção semelhante ao 3-PG em relação módulo clima e planta, possuindo uma maior sensibilidade em nível de solo que o modelo 3-PG, simulando com maior grau de acurácia o crescimento e a produtividade do eucalipto em diferentes solos.

O modelo 3-PG representa o efeito do clima na produção florestal de maneira eficiente, porém, em nível de solo, ele possui baixa sensibilidade.

ARTIGO I

COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS E DESEMPENHO ENTRE OS MODELOS APSIM *NEXT GENERATION* E 3-PG PARA A CULTURA DO *EUCALYPTUS*

RESUMO

Eucalyptus é a árvore mais plantada no Brasil, podendo servir para reflorestamento, sistemas agroflorestais ou para o comércio de madeira. Poucos modelos existem para simular a produção florestal, sendo o 3-PG um dos pioneiros e, mais recente, o novo modelo desenvolvido APSIM *Next Generation*. Esses modelos são ferramentas aprimoradas para simular o potencial de produção do eucalipto e avaliar o impacto das mudanças. Neste estudo, a adaptabilidade dos modelos APSIM e 3-PG foi avaliada, por uma calibração e validação, com base em dados observacionais coletados em experimentos de campo para a cultura do *Eucalyptus*. Os resultados mostraram que ambos os modelos tiveram bom desempenho em simular as condições contrastantes de clima, solo e genótipos. Os índices estáticos obtidos na validação para o APSIM foram 0.76 para o NSE, 0.83 para R² e 44.6 m³ ha⁻¹ de RMSD, enquanto os obtidos pelo 3-PG foram 0.66 para NSE, 0.77 para R² e 37.3 m³ ha⁻¹ de RMSD. De acordo com os resultados, ambos os modelos em estudo foram eficazes e precisos para simular o eucalipto em diferentes condições de clima e solo. Ambos os modelos podem ser aplicados com confiança para estudar melhores práticas agronômicas e o impacto das mudanças climáticas.

1 INTRODUÇÃO

A maioria das árvores plantadas no Brasil pertence ao gênero *Eucalyptus*, existindo em diferentes condições edafoclimáticas no país. Esse gênero é o grupo de espécies florestais mais relevantes para o sequestro de carbono, além de ser uma importante fonte de matéria-prima para a produção de biomassa, papel e celulose (IBA, 2021; Carvalho et al., 2022).

Apesar de ser plantado em diversas regiões do Brasil e possuir boa adaptabilidade a diversas condições de solo e clima, o seu crescimento ainda pode ser limitado. Essas limitações dependem principalmente das diversas combinações existentes de clima, solo, genótipo, pragas e doenças e práticas de manejo (Stape et al., 2010). Além disso, essas limitações associadas às mudanças climáticas tendem a potencializar o problema, introduzindo riscos e incertezas significativas em relação à produtividade florestal futura.

Nesse contexto, os modelos de cultivo têm ganhado destaque como uma alternativa promissora. Esses modelos são ferramentas essenciais para avaliar as potenciais consequências da variação climática e desenvolver estratégias de adaptação em escalas regionais de campo (Jones et al., 2017). Os modelos são representações matemáticas de sistemas reais e oferecem uma abordagem eficiente para o estudo de sistemas biofísicos complexos (Holzworth et al., 2011). Os modelos de cultivo são amplamente utilizados na investigação de práticas agrícolas sustentáveis, como o planejamento de recursos hídricos, previsão dos efeitos das mudanças climáticas nas culturas e aprofundamento do conhecimento sobre os processos fisiológicos das plantas e suas interações ambientais e culturais (Setiyono et al., 2007; Morel et al., 2020; Sales et al., 2020).

Existem vários modelos de simulação disponíveis para estimar a produtividade do eucalipto, sendo o modelo 3-PG - *Physiological Principles in Predicting Growth* (Landsberg; Waring, 1997) um dos pioneiros em espécies florestais. Diversos trabalhos comprovam a eficácia em simular o crescimento e produção de eucalipto no mundo, como observado por Borges et al (2012), Rua et al. (2020) e Zhang et al. (2023).

Um dos modelos que tem ganhado notoriedade na simulação de culturas é o APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*). Trata-se de um modelo biofísico utilizado para simular mais de trinta culturas, pastagens e espécies de árvores (Holzworth et al., 2014). Recentemente, foi lançada a versão aprimorada desse modelo, chamada *APSIM Next Generation*, que oferece funcionalidades e facilidades aprimoradas. Essa nova versão permite que o modelo execute simulações mais complexas em diferentes escalas temporais, espaciais e em vários sistemas operacionais (Holzworth et al., 2018; Yang et al., 2020).

O modelo *APSIM Next Generation* tem sido utilizado para simular espécies silviculturais, tais como plantações de eucalipto (Valadares et al., 2018; Elli, et al., 202a; Elli, et al., 2020b), pinus (Smethurst et al., 2020) e até mesmo em sistemas agroflorestais (Smethurst et al., 2017). A estrutura do *APSIM Next Generation* inclui uma coleção de classes genéricas de *software*, como órgãos e funções de plantas, que podem ser montadas e parametrizadas (Brown et al., 2018; Zhu et al., 2021).

Estudos comparativos sobre o desempenho de modelos com diferenças estruturais em ambientes contrastantes são necessários, a fim de analisar qual modelo é mais adequado para determinadas aplicações (Elli et al., 2019). Neste contexto, o objetivo deste estudo foi calibrar e validar os modelos *APSIM Next Generation* e 3-PG para diferentes genótipos de eucalipto em condições contrastantes de clima e solo. Essa análise comparativa fornecerá *insights* importantes para melhorar a compreensão e previsão do desempenho das plantações de eucalipto em condições diversas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Visão geral do modelo APSIM *Next Generation Eucalyptus*

O modelo APSIM foi desenvolvido para simular processos biofísicos em sistemas agrícolas onde há interesse na produção, resultados ambientais e econômicos em relação a solos, clima, genótipo (incluindo espécies) e manejo (Holzworth et al., 2018). APSIM tem sido amplamente utilizado na agricultura para síntese quantitativa de conhecimento em pesquisa, tomada de decisão na fazenda, projeto de sistemas agrícolas, avaliação de previsões climáticas sazonais, análise de cadeias de abastecimento do agronegócio, desenvolvimento de diretrizes de gestão de resíduos, análise de risco, avaliação de políticas governamentais e como um guia para pesquisas e atividades educacionais (Smethurst, et al., 2020). O novo modelo APSIM *Next Generation Eucalyptus* é uma base de código fonte mais moderna, multiplataforma, baseada no framework (Khaembah et al., 2017). Ela leva em consideração a estrutura de modelagem *Eucalyptus* do modelo APSIM-*Growth* (Huth et al., 2001), mas é implementada no *Plant Modeling Framework* (PMF) (Brown et al., 2014).

A produção diária de biomassa é calculada a partir da radiação solar interceptada diariamente e da eficiência do uso da radiação (RUE), que é afetada pelo solo e por fatores climáticos (Elli et al., 2020b). O modelo de Eucalipto APSIM *Next Generation* inclui ainda cinco submodelos relacionados a diferentes componentes da planta: folha, ramo, caule, raiz grossa e raiz fina. A plataforma do APSIM *Next Generation* também inclui gráficos e estatísticas que mostram o desempenho do modelo em relação aos dados observados (Holzworth et al., 2018). O modelo e a documentação estão disponíveis em www.apsim.info.

2.2 Visão geral do modelo 3-PG

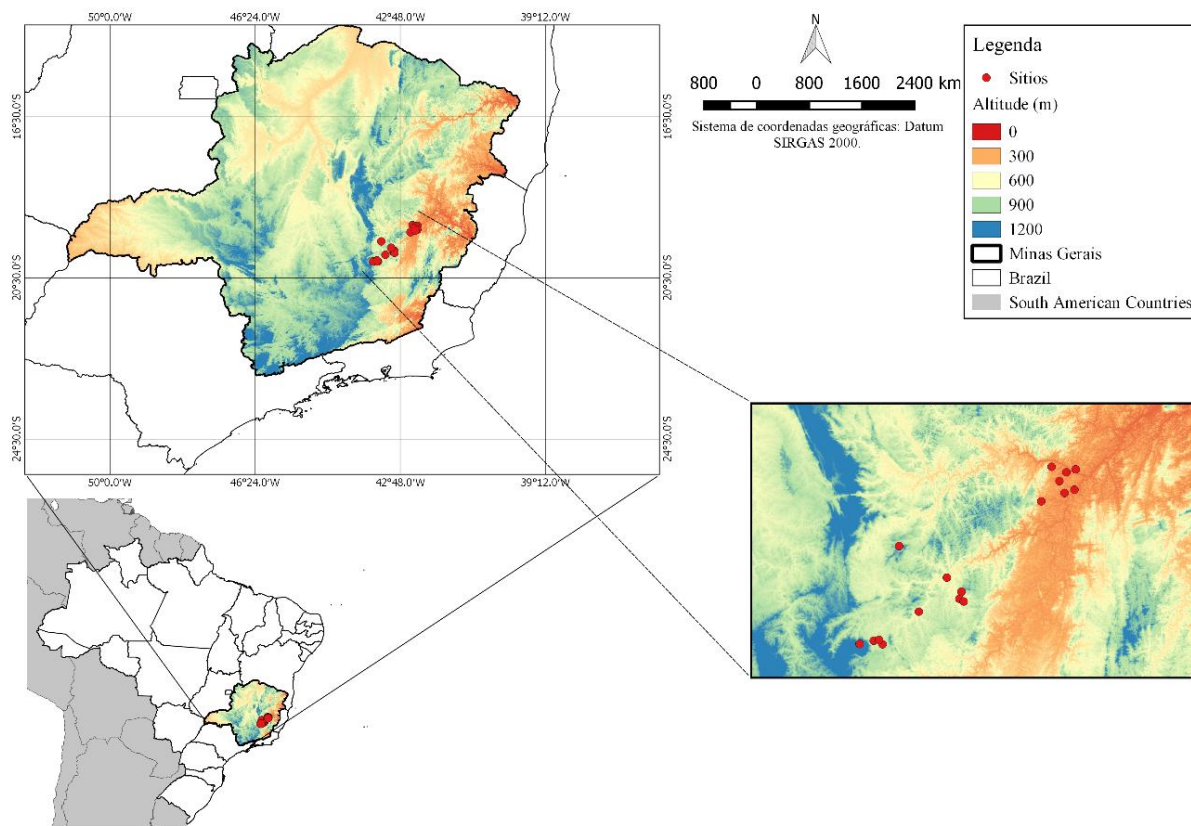
O modelo 3-PG (*Physiological Processes Predicting Growth*) foi desenvolvido na Austrália e na América do Norte, inicialmente para povoamentos uniformes de árvores perenes de folhas largas e coníferas (Forrester et al., 2020). Esse modelo é baseado em dois conjuntos principais de cálculos: (1) definir o incremento de biomassa e (2) alocar o crescimento a diferentes compartimentos da árvore, determinando o padrão de crescimento do povoamento (Landsberg et al., 2001).

Esses cálculos são realizados em cinco submodelos: (1) O submodelo de luz: calcula a absorção de luz usando coeficientes de extinção de luz específicos da espécie e índice de área foliar; (2) O segundo, submodelo de produtividade: calcula a produtividade primária bruta (GPP), com base em uma eficiência quântica de dossel específica da espécie (αC) que é reduzida devido às limitações impostas pela temperatura, geada, VPD, umidade do solo, estado de nutrientes do solo, CO₂ atmosférico e idade do povoamento (Landsberg & Waring, 1997; Sands & Landsberg, 2002; Almeida, Landsberg, & Sands, 2004); (3) No terceiro sub modelo, temos a água: no qual a equação de Penman-Monteith é usada para calcular a transpiração da árvore e a evaporação do solo e, junto com a interceptação do dossel, prevê a evapotranspiração (Trotsiuk, Hartig & Forrester, 2020); (4) O quarto submodelo, alocação: aloca a Produtividade Primária Líquida (NPP) em diferentes compartimentos de árvore, começando com raízes, seguido por caule e folhagem, dependendo do estado de nutrientes do solo, VPD e umidade do solo (Augustynczyk et al., 2017; Trotsiuk, Hartig & Forrester, 2020); (5) Por fim, um submodelo de mortalidade de árvores: seguindo a lei de autodesbaste de -1,5 e um fator dependente de idade e estresse (Bryars et al., 2013).

2.3 Descrição do site experimental

Os experimentos de campo (sítios florestais) para a calibração foram conduzidos no município de Santana do Paraíso, estado de Minas Gerais, Brasil, na bacia do Rio Doce, por uma empresa florestal com plantios na região do Vale do Rio Doce, MG. A classificação climática da região, segundo Köppen, é do tipo Aw, temperado chuvoso-mesotérmico, com precipitação média anual de 1.163 mm e temperatura média anual de 25,2 °C. A validação foi realizada com dados independentes, utilizando quatorze (14) sítios florestais distintos, pertencente a uma empresa florestal com plantios na região do Vale do Rio Doce, no estado de Minas Gerais, Brasil. Os dados climáticos (temperaturas máxima e mínima, radiação solar e precipitação) foram obtidos por meio de estações meteorológicas automáticas próximas aos experimentos. Todos os sítios florestais utilizados podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Localização dos sítios florestais utilizados nesse estudo



2.4 Descrição dos tratamentos

Os procedimentos de calibração do modelo envolveram três diferentes tratamentos de aplicação de água e nutrientes no solo: irrigação (I), fertirrigação (F) e sem irrigação e fertirrigação (SIF), conforme detalhado na Tabela 1. Essas variações foram combinadas com um espaçamento de plantio de 3 x 3,3 metros, totalizando 1001 plantas por hectare e quatro materiais genéticos clonais de eucalipto, dois clones de Híbrido de *Eucalyptus grandis* - Rio Claro (57 e 2719); um clone de *Eucalyptus grandis* (129) e um híbrido clonal de *E. grandis* x *E. urophylla*, “urograndis” (1215). No procedimento da calibração, utilizou-se a média dos quatro (4) clones.

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos de água e nutrientes

tratamento	fertilização	irrigação suplementar
	-----%	
SFI	Nutricalc ^{1/} (35 m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Sem
I	Nutricalc ^{1/} (35 m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Com (100% ETc)
FI	Nutricalc ^{1/} (60 m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Com (100% ETc)

^{1/}Barros et al. (1995); Evapotranspiração da cultura (ETc).

Após o plantio, realizaram-se as adubações de implantação: 180 g planta⁻¹ de NPK 06-30-06 e 20 kg ha⁻¹ Produbor (10% B). Nas adubações de manutenção foram aplicados 40 kg ha⁻¹ de Produbor e 400 kg ha⁻¹ de KCl + 2% B. No tratamento fertirrigado foram aplicados, por meio de fertirrigação, a partir de 28/08/02, fertilizações adicionais calculadas em função da curva estimada de demanda de nutrientes (N, P, K, S e micronutrientes) para plantios de eucalipto com produtividade de 360 m³ ha⁻¹ de tronco aos 6 anos. As fertirrigações eram realizadas três vezes por semana e as quantidades totais aplicadas de cada um dos nutrientes estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Total de suplementação nutricional fornecido pelo tratamento fertirrigado no período de agosto de 2002 até junho de 2008

N	P	K	Ca	Mg	B	Zn	Cu	Mn
-----kg ha ⁻¹ -----					-----kg ha ⁻¹ -----			
2958.4	206.4	206.4	1100.8	75.7	53.7	49.5	49.5	4.5

Para a validação, foram utilizados ensaios de campo sem irrigação e fertirrigação (SFI). A descrição dos locais onde ocorreram os ensaios para a calibração e validação segue na Tabela 3. Vale ressaltar que na validação foram utilizados solos, locais e clones distintos.

Tabela 3 – Descrição dos experimentos

Sítio	Genótipo/ Tratamento	Número do sítio	Plantio	Colheita	Solo	Finalidade	Município
SP	SFI	1	10/17/2001	08/17/2008	1	Calibração	Santana do Paraiso
SP	FI	1	10/17/2001	08/17/2008	1	Calibração	Santana do Paraiso
SP	I	1	10/17/2001	08/17/2008	1	Calibração	Santana do Paraiso
BO	Clone_4	2	04/28/2010	05/29/2017	2	Validação	Belo Oriente
BO_2	Clone_3	3	04/16/2010	10/10/2016	2	Validação	Belo Oriente
BO_3	Clone_3	4	04/28/2010	05/29/2017	2	Validação	Belo Oriente
BO_4	Clone_4	5	04/28/2010	05/29/2017	2	Validação	Belo Oriente
SDP	Clone_1	6	06/26/2008	05/18/2016	3	Validação	São Domingos do Prata
SDP_2	Clone_1	7	06/26/2008	06/22/2016	5	Validação	São Domingos do Prata
SDP_3	Clone_1	8	09/26/2008	05/18/2016	3	Validação	São Domingos do Prata
SDP_4	Clone_1	9	08/10/2008	04/08/2016	6	Validação	Nova Era
SB	Clone_2	10	06/01/2006	08/01/2013	7	Validação	Catas Altas
SB_2	Clone_4	11	08/18/2007	04/25/2016	4	Validação	Rio Piracicaba
SB_3	Clone_2	12	06/01/2006	08/01/2013	7	Validação	Catas Altas
SB_4	Clone_2	13	06/01/2006	08/01/2013	7	Validação	Catas Altas
SB_5	Clone_2	14	06/01/2006	08/01/2013	7	Validação	Catas Altas
SB_6	Clone_1	15	06/21/2007	04/25/2016	7	Validação	Rio Piracicaba

2.5 Parâmetros do solo e variáveis analisadas

Os arquivos de solo para cada local foram criados usando dados de solo específicos de cada região avaliada. Para estimar os parâmetros físico-hídricos do solo, foram utilizadas funções de pedotransferência - FPT's, obtendo assim a umidades de saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, requeridos na simulação pelo modelo *APSIM Next Generation*. Utilizando a metodologia proposta por Tomasella et al. (2003), foram derivados os parâmetros para os solos da região.

Os dados de entrada necessários para essas funções (teores de areia, silte, argila, MO e pH) foram obtidos por amostras de solo coletadas em cada local estudado. A Tabela 4 apresenta as propriedades básicas do perfil do solo deste estudo. Já para o modelo 3-PG, o solo arquivo de solo foi selecionado de acordo com suas características granulométricas, sendo classificados como solos arenosos (0-15% de argila), de textura média (15-35), argilosos (35-60) e muito argilosos (60-100% de argila), de acordo com o manual de recomendação da EMBRAPA (2004).

Tabela 4 – Propriedades do solo utilizadas como entrada no modelo APSIM para simulação do eucalipto

ID solo	Profundidade m	PMP -----m ³ m ³ -----	CC m ³ m ³ -----	SAT	pH H ₂ O	CO -----%-----	Argila	Areia	Silte
1	0.0-0.2	0.199	0.281	0.366	4.52	1.044	65	29	6
1	0.2-0.4	0.199	0.281	0.366	4.44	0.678	67	27	6
1	0.4-0.6	0.248	0.351	0.366	4.48	0.545	58	35	7
1	0.6-2.0	0.235	0.324	0.340	4.48	0.545	65	28	7
1	2.0-3.0	0.231	0.319	0.340	4.48	0.545	65	28	7
1	3.0-4.0	0.231	0.319	0.340	4.48	0.100	65	28	7
1	4.0-5.0	0.231	0.319	0.340	4.48	0.100	65	28	7
2	0.0-0.15	0.250	0.350	0.550	4.45	1.505	58	35	7
2	0.15-0.84	0.260	0.350	0.540	4.72	0.464	73	25	2
2	0.84-1.5	0.250	0.430	0.540	5.58	0.464	40	21	39
2	1.5-2.0	0.250	0.430	0.540	5.58	0.464	40	21	39
2	2.0-4.0	0.250	0.430	0.540	5.58	0.464	40	21	39
2	4.0-5.0	0.250	0.430	0.540	5.58	0.464	40	21	39
3	0.0-0.19	0.207	0.310	0.510	4.40	1.450	44	49	7
3	0.19-0.43	0.238	0.344	0.510	4.39	0.970	50	42	8
3	0.43-1.06	0.244	0.336	0.500	4.71	0.610	57	37	6
3	1.06-2.0	0.245	0.337	0.490	4.92	0.340	56	38	6
3	2.0-3.0	0.245	0.337	0.490	4.92	0.340	56	38	6
3	3.0-4.0	0.245	0.337	0.490	4.92	0.340	56	38	6
3	4.0-5.0	0.245	0.337	0.490	4.92	0.340	56	38	6
4	0.0-0.15	0.260	0.381	0.544	4.61	1.650	54	37	9
4	0.15-0.5	0.284	0.396	0.541	4.77	0.900	64	28	8
4	0.5-0.98	0.288	0.401	0.548	5.09	0.900	65	27	8
4	0.98-1.5	0.183	0.448	0.567	5.34	0.890	52	27	21
4	1.5-2.0	0.183	0.448	0.567	5.34	0.890	52	27	21
4	2.0-4.0	0.183	0.448	0.567	5.34	0.890	52	27	21
4	4.0-5.0	0.183	0.448	0.567	5.34	0.890	52	27	21
5	0.0-0.16	0.266	0.403	0.615	4.34	3.240	72	25	2
5	0.16-0.39	0.304	0.449	0.608	4.56	1.730	74	19	8
5	0.39-0.97	0.265	0.364	0.588	5.22	1.040	78	22	0
5	0.97-1.34	0.275	0.368	0.578	4.93	0.930	81	17	1
5	1.34-2.00	0.272	0.361	0.561	4.85	0.930	80	19	1
5	2.00-3.00	0.272	0.361	0.561	4.85	0.930	80	19	1
5	3.00-4.00	0.272	0.361	0.561	4.85	0.930	80	19	1
5	4.00-5.00	0.272	0.361	0.561	4.85	0.930	80	19	1
6	0.0-0.19	0.254	0.377	0.585	4.41	2.130	56	34	10
6	0.19-0.78	0.261	0.368	0.532	4.68	0.880	57	33	10
6	0.78-1.26	0.268	0.373	0.521	5.14	0.590	56	30	13
6	1.26-2.0	0.172	0.440	0.566	5.34	0.570	12	35	53
6	2.0-3.0	0.172	0.440	0.566	5.34	0.570	12	35	53
6	3.0-4.0	0.172	0.440	0.566	5.34	0.570	12	35	53
6	4.0-5.0	0.172	0.440	0.566	5.34	0.570	12	35	53
7	0.0-0.20	0.209	0.314	0.498	4.66	1.190	42	48	10
7	0.20-0.41	0.255	0.363	0.517	4.72	0.800	52	35	13
7	0.41-0.73	0.250	0.348	0.499	4.91	0.550	54	36	11
7	0.73-1.65	0.210	0.379	0.510	5.15	0.550	29	35	36
7	1.65-2.0	0.210	0.379	0.510	5.15	0.550	29	35	36
7	2.0-4.0	0.210	0.379	0.510	5.15	0.550	29	35	36
7	4.0-5.0	0.210	0.379	0.510	5.15	0.550	29	35	36

Ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de campo (CC), saturação (SAT) e carbono orgânico (CO).

Os modelos APSIM e 3-PG foram escolhidos devido à sua ampla utilização em todo o mundo, sendo os mais utilizados na área florestal. Para o modelo APSIM, a etapa de calibração teve como objetivo produzir um modelo funcional de eucalipto fazendo apenas pequenas modificações nos parâmetros genéricos da cultura para melhorar o ajuste entre os dados simulados e observados. Na calibração do modelo 3-PG, utilizou-se como base a calibração realizada por Borges (2012), sendo ajustadas, a partir disso, novos parâmetros. Também se utilizou uma nova abordagem desenvolvida por Silva et al. (2023), ajustando os parâmetros as e ns da relação $DAP = f(w_s)$ (Equação 1), frações mínimas (η_{Rn}) e máximas (η_{Rx}) de biomassa alocada à raiz e idade de fechamento do dossel (t_c), por redes neurais artificiais.

$$DAP = \left(\frac{w_s}{as} \right)^{1/ns} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo que DAP é o diâmetro a 1.30 m de altura (cm); as e ns são parâmetros da relação alométrica; e w_s é a biomassa média do caule (kg árvore^{-1}).

Para a calibração, as variáveis analisadas foram: biomassa acima do solo (t ha^{-1}), altura de planta (m), diâmetro a altura do peito – DAP (cm), índice de área foliar – IAF ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$), eficiência da área foliar para o tronco – eafTronco (g m^{-2}), obtida dividindo-se o valor de produção de biomassa do respectivo componente pelo valor de IAF, conteúdo de N no caule (g m^{-2}) e conteúdo de N na parte aérea (folha + galhos) (g m^{-2}), para os tratamentos irrigado (I), fertirrigado (FI) e sem irrigação e fertirrigação (SFI). A altura de planta utilizada neste estudo como um output do 3-PG, foi obtida pela relação com o DAP, através da equação desenvolvida por Oliveira et al. (2018). A validação foi realizada com base em dados de volume de tronco ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e incremento médio anual – IMA ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), retirado de plantas que estavam em diferentes locais, tipos de solo e materiais genéticos.

2.6 Análise dos dados

As seguintes estatísticas foram usadas para avaliar o desempenho dos modelos (Dawson et al., 2007; Moriasi et al., 2007; Yang et al., 2014): eficiência de Nash Sutcliffe (NSE), a Raiz do erro quadrático médio para a razão de desvio padrão (RSR), o índice de concordância de Willmott (d), o Erro médio (ME), Erro Absoluto Médio (MAE), o coeficiente de determinação (R^2), e a o desvio da raiz quadrada média (RMSE).

O NSE (Equação 2) descreve a magnitude relativa do resíduo da variância em comparação com a variância medida. O valor NSE ($-\infty$ a 1), sendo que a classificação de desempenho 'muito bom' equivalia a NSE 0.75–1.00, NSE 'bom' 0.65–0.75, 'satisfatório' NSE 0.50–0.65, e 'insatisfatório' se NSE < 0.50 (Moriasi et al., 2007).

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Equação 2}$$

O RSR (Equação 3) é calculado como a razão entre o RMSE e o desvio padrão dos dados medidos. Quanto menor o valor do RSR melhor o desempenho. O valor RSR é classificado como 'muito bom' (RSR 0.00–0.50), 'bom' (RSR 0.50–0.60), 'satisfatório' (RSR 0.60–0.70), e 'insatisfatório' se RSR > 0.70 (Moriasi et al., 2007).

$$\text{RSR} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad \text{Equação 3}$$

O índice de concordância de Willmott (Willmott et al., 1985), representado pela letra “d”, é uma medida que reflete a exatidão dos valores estimados/preditos em relação aos valores observados (Equação 4). Para “d”, valores > 0.90 foram considerados muito bons, enquanto valores entre 0.80–0.90 foram considerados bons. Valores entre 0.50–0.80 foram considerados satisfatórios, enquanto valores menores que < 0.50 foram considerados ruins.

$$d = 1 - \frac{\sum_i (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{Equação 4}$$

O viés (Equação 5) calcula o valor médio pelo qual a observação é maior que o estimado/predito. Assim, para um modelo imparcial, o viés deve estar mais próximo de 0.

$$\text{ME} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i) \quad \text{Equação 5}$$

O coeficiente de determinação R^2 (Equação 6) é uma medida estatística que explica a variação do observado para o estimado/predito. Para R^2 , valores > 0.90 foram considerados muito bons, enquanto valores entre 0.70 e 0.90 foram considerados bons. Valores entre 0.50 e 0.70 foram considerados moderadamente bons, enquanto valores menores que 0.50 foram considerados ruins (Chibarabada et al., 2020).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \right]^2 \quad \text{Equação 6}$$

O RMSD (Equação 7) é uma medida da magnitude geral dos erros, e estima o resíduo entre os valores observados e estimados/preditos, assim, quanto menor o RMSD, melhor o modelo.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{N}} \quad \text{Equação 7}$$

O MAE (Equação 8) representa a média da diferença absoluta entre a predição do modelo e o valor observado. Ele é calculado a partir da média dos erros absolutos, ou seja, utiliza-se o módulo de cada erro para evitar a subestimação.

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - E_i| \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

E_i - valor estimado/predito;

O_i - valor observado em campo

\bar{E} - média do valor estimado/predito;

\bar{O} - média do valor observado em campo; e

N - é o número de observações.

Para todos os cálculos estatísticos, foi utilizado o *software Microsoft Office Excel®*, a fim de auxiliar na organização dos dados e o programa de código aberto R.

3 RESULTADOS

3.1 Calibração do modelo

Os dados experimentais de 2001-2008 realizados no município de Santana do Paraíso (SP) foram usados para calibrar os modelos *APSIM Next Generation Eucalyptus* e 3-PG. Os coeficientes genotípicos, disponíveis para cultivares no APSIM e 3-PG, foram primeiro ajustados (documento suplementar S1) para alinhar os valores observados e simulados, levando em conta as variáveis disponíveis no processo de calibração.

A calibração do modelo APSIM forneceu uma previsão precisa para biomassa acima do solo, DAP e eafTronco para o conjunto de dados, considerando as três combinações de aplicação de água e de nutrientes ao solo: irrigado (I), fertirrigado (FI) e sem irrigação e fertirrigação (SFI), no qual os dados simulados tiveram padrão de resposta muito próximo ao observado em campo (Figura 2a, 2b, 2e). Pequenas discrepâncias entre as variáveis analisadas (Figura 2a, 2b, 2e) para os diferentes tratamentos significavam que a calibração adicional para predição foi possível dentro da estrutura do modelo atual.

A calibração do modelo 3-PG forneceu uma previsão precisa para o DAP, altura de planta e eafTronco para o conjunto de dados, considerando as três combinações de aplicação de água e de nutrientes ao solo: irrigado (I), fertirrigado (FI) e sem irrigação e fertirrigação (SFI), como observado na Figura 3b, 3d, e 3e, respectivamente. É possível perceber que o IAF (Figura 2c) apresentou uma boa concordância em relação aos dados simulados e observados para o modelo APSIM, todavia o 3-PG apresentou maiores erros (Figura 3c). Isso pode ser confirmado pelo alto valor de ME $1.04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, desempenho 'insatisfatório' (NSE = -0.80), seguido de alto valor de RSR (1.28) e erros MAE e RMSD $>1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Tabela 5).

Para a altura de planta (Figura 2d), o APSIM teve um desempenho fraco em explicar a variação, com uma maior discrepância entre os dados observados e simulados, apresentando claramente uma subestimativa do modelo para essa variável. Isso pode ser confirmado pelo alto valor de ME -6.62 m (Tabela 5). Na Tabela 5 é possível ainda observar que a altura de planta apresentou uma concordância insatisfatória (NSE 0.21) seguida de alto valor de RSR (0.85) e erros MAE e RMSD $>6 \text{ m}$, erros esses considerados muito altos visto que uma altura máxima do eucalipto chega a 30 m. Ao contrário do observado pelo APSIM, o modelo 3-PG simulou bem a altura de planta (Figura 3d), com baixos erros MAE e RMSD ($>3.76 \text{ m}$), como observado na Tabela 5. Além disso, houve bom desempenho, sendo confirmado pelos valores NSE e RSR de 0.80 e 0.43, respectivamente, além de um alto grau de ajuste ($R^2 = 91$).

Figura 2 – Calibração do modelo *APSIM Next Generation Eucalyptus* para biomassa acima do solo (a), diâmetro a altura do peito – DAP (b), índice de área foliar – IAF (c), altura de planta (d) e eficiência da área foliar para o tronco – eafTronco (e), submetido aos tratamentos irrigado (I), fertirrigado (FI) e sem irrigação e fertirrigação (SFI) no período de agosto de 2002 até junho de 2008 no município de Santana do Paraíso, Brasil

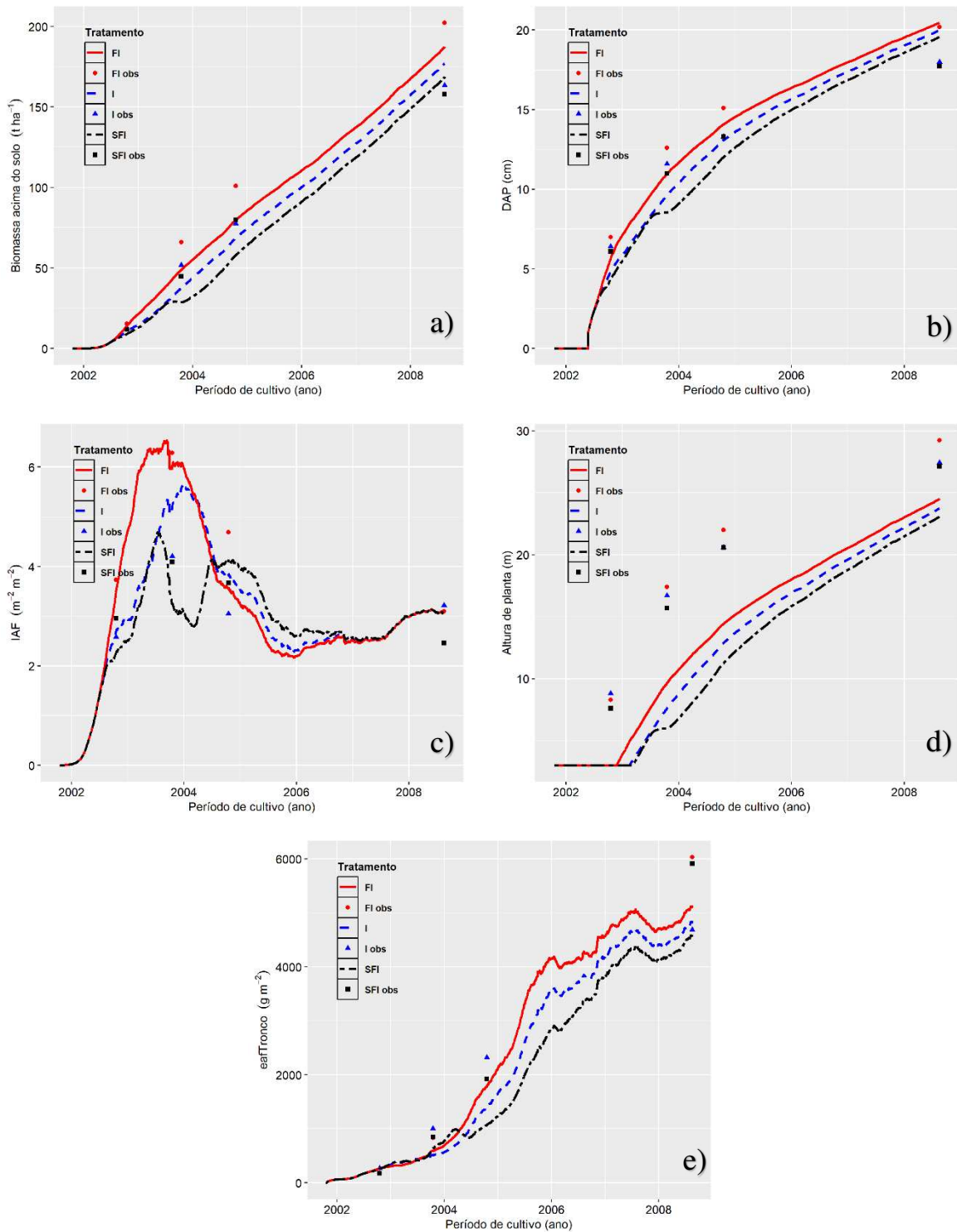


Figura 3 – Calibração do modelo 3-PG para biomassa acima do solo (a), diâmetro a altura do peito – DAP (b), índice de área foliar – IAF (c), altura de planta (d) e eficiência da área foliar para o tronco – eafTronco (e), submetido aos tratamentos irrigado (I), fertirrigado (FI) e sem irrigação e fertirrigação (SFI) no período de agosto de 2002 até junho de 2008 no município de Santana do Paraíso, Brasil

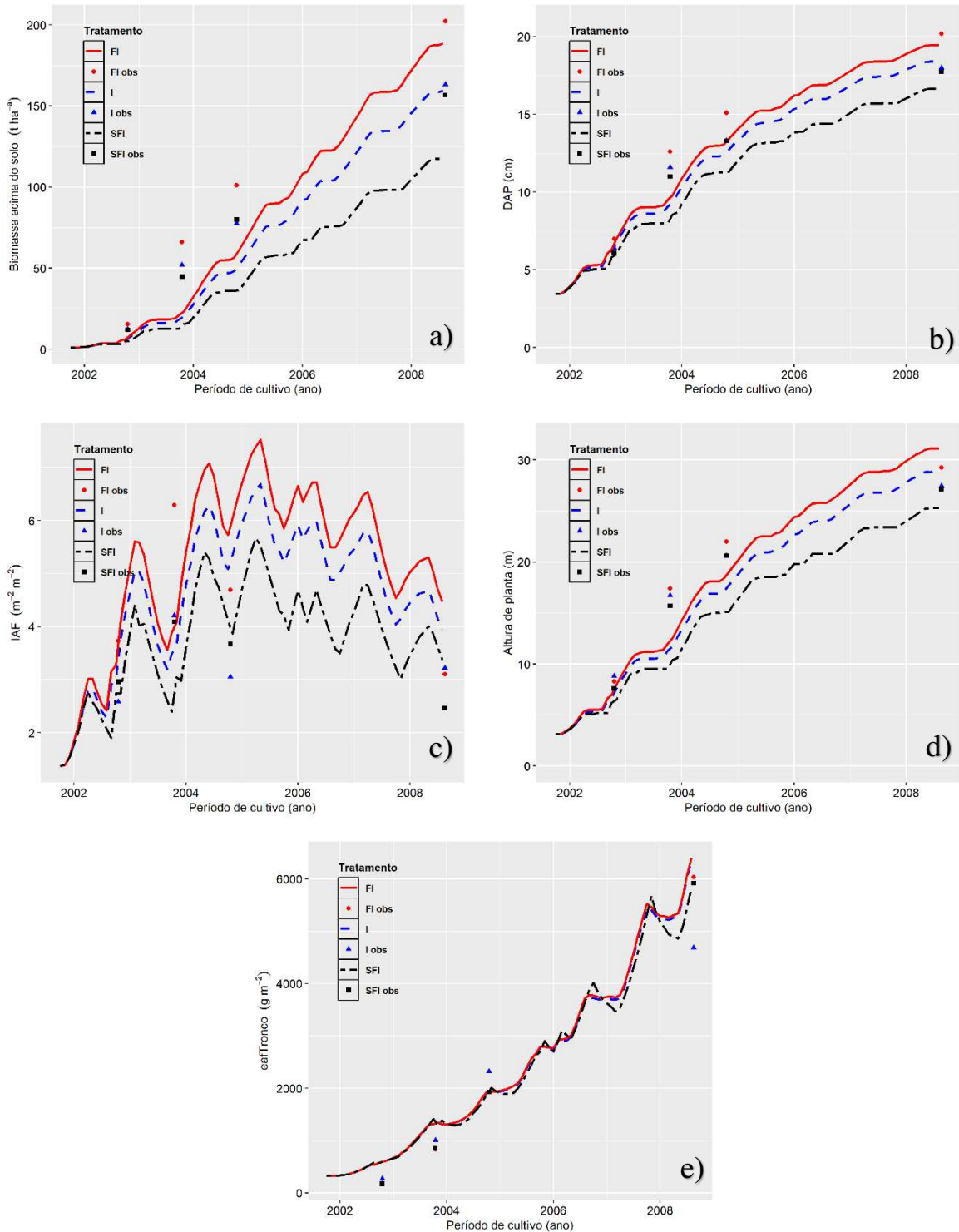


Tabela 5 – Estatísticas de erro de previsão do modelo APSIM e 3-PG na calibração utilizando a média de quatro (4) clones distintos, submetido aos tratamentos irrigado (I), fertirrigado (FI) e sem irrigação e fertirrigação (SFI) em Santana do Paraíso, Brasil

Variável	R ²	NSE	RSR	MAE	ME	RMSD
Calibração APSIM						
Biomassa acima do solo (t ha ⁻¹)	0.96	0.95	0.21	13.1	-6.88	14.4
DAP (cm)	0.97	0.92	0.27	1.44	-0.76	1.58
IAF (m ² m ⁻²)	0.65	0.60	0.60	0.52	-0.04	0.63
Altura de planta (m)	0.93	0.21	0.85	6.62	-6.62	6.93
eafTronco (g m ⁻²)	0.96	0.89	0.32	447.5	-392.3	611.1
Calibração 3-PG						
Biomassa acima do solo (t ha ⁻¹)	0.94	0.76	0.47	25.6	-25.6	30.0
DAP (cm)	0.94	0.86	0.36	1.41	-1.34	1.74
IAF (m ² m ⁻²)	0.04	-0.80	1.28	1.04	0.12	1.23
Altura de planta (m)	0.91	0.80	0.43	3.30	-2.74	3.76
eafTronco (g m ⁻²)	0.95	0.92	0.26	457.11	341.58	609.69

R², NSE, RSR, MAE, ME e RMSD representam o coeficiente de determinação, a eficiência de Nash Sutcliffe, a raiz do erro quadrático médio para a razão de desvio padrão, o erro absoluto médio, o erro médio e desvio da raiz quadrada média, respectivamente.

Conforme indicado na Tabela 5, a calibração do APSIM demonstrou um desempenho consistente e robusto, com exceção da altura das plantas. A calibração do modelo forneceu boa previsão de a biomassa acima do solo, DAP e eafTronco, com valores de R² >0.90, ou seja, uma variância explicada >90%. Já o modelo 3-PG, também apresentou resultados bons em sua calibração, exceto para o IAF, que teve resultados insatisfatórios (Tabela 5).

Com o modelo APSIM, o IAF apresentou R² de 0.65, considerado aceitável (moderadamente bom), apesar de ter a segunda menor variância explicada dentre as variáveis usadas na calibração. A baixa qualidade na previsão do IAF é uma característica comum dos estudos de modelagem (Falconnier et al. 2019; Saddique et al. 2019; Attia et al. 2021; Mamassi et al., 2022), mas isso não afetou drasticamente as estimativas das demais características.

Os valores do erro médio observado pelo APSIM indicam que o modelo subestimou os dados de campo (Tabela 5), todavia, a subestimativa foi baixa (exceto para altura de planta), mantendo, portanto, ótimos resultados estatísticos. Isso pode ser confirmado pelos baixos valores de MAE (13.1 t ha⁻¹) para biomassa acima do solo e baixos valores de RMSD para DAP (1.58 cm). Todavia, para o modelo 3-PG, não foram todas as características que subestimaram os dados reais (Tabela 5), sendo observado esse padrão de resposta nas variáveis biomassa acima do solo, DAP e altura de planta.

O desempenho do modelo APSIM baseado em NSE foi classificado como muito bom para as variáveis biomassa acima do solo, DAP e eafTronco, com valores >0.89, seguidos de RSR ≤0.32, respectivamente. O modelo 3-PG baseado em NSE foi classificado como muito bom para as variáveis biomassa acima do solo, DAP, altura de planta e eafTronco, com valores >0.76, seguidos de RSR ≤0.47, respectivamente.

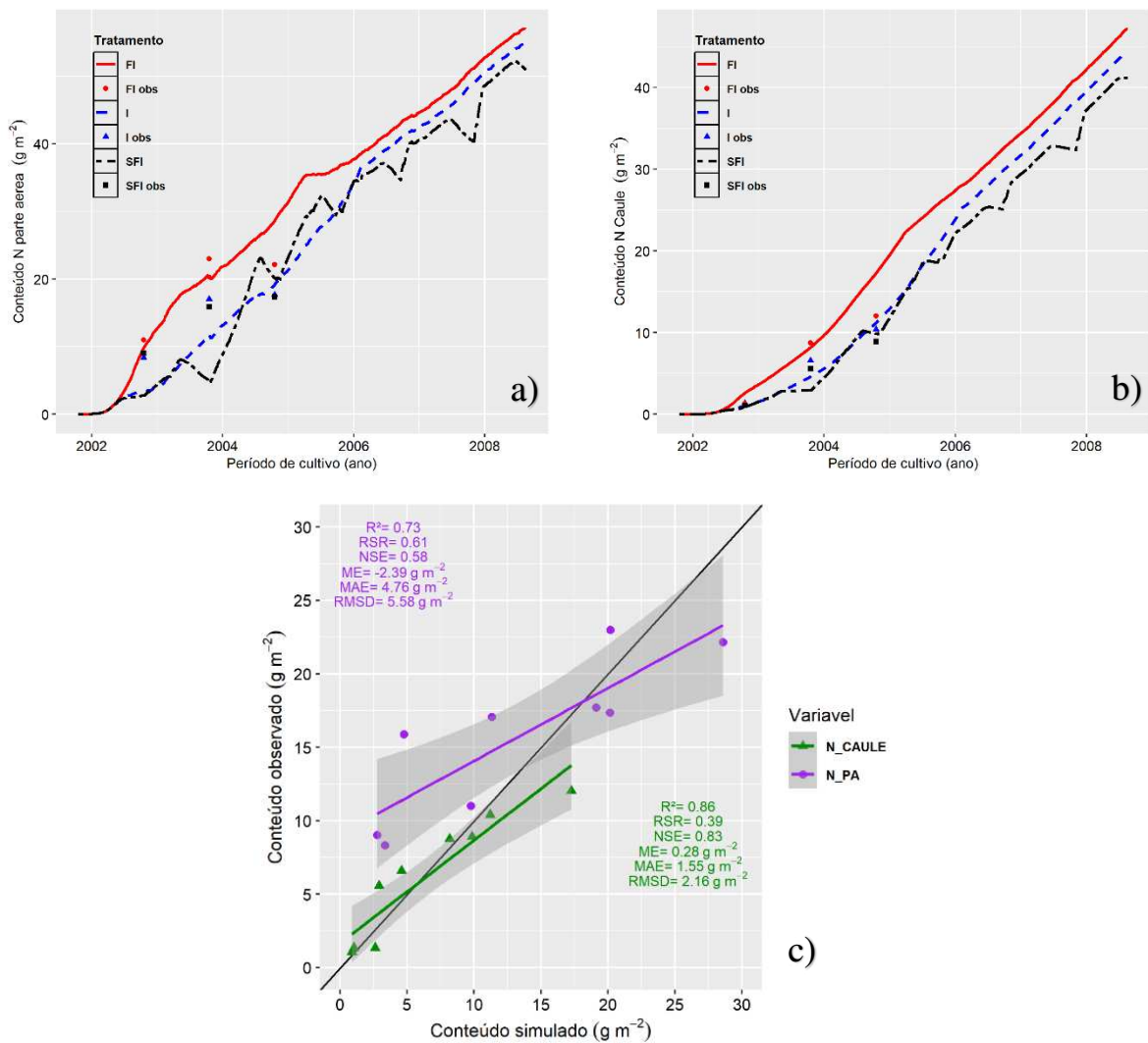
O fato de que os modelos foram capazes de simular com precisão a maioria das variáveis analisadas, em três (3) tratamentos com diferentes combinações de água e nutrientes, indica que o modelo calibrado é adequado para uso posterior. O mesmo foi indicado por Ebrahimi-Mollabashi et al. (2019), ao avaliar a dinâmica do sistema radicular da soja com o modelo APSIM, depois de obter resultados positivos na calibração.

A Figura 4 apresenta o conteúdo de N acumulado no caule e na parte aérea para o modelo APSIM. É possível observar que o tratamento fertirrigado promoveu maior acúmulo de N na parte aérea e no tronco (Figura 4a, 4b). Os dados relacionados ao conteúdo de N no caule e na parte aérea seguiu o mesmo padrão de resposta que os obtidos na Tabela 5, com bons resultados.

É evidente que o acúmulo de N na parte aérea apresentou um desempenho ligeiramente inferior ao acúmulo de nitrogênio no caule (Figura 4c). Isso indica uma menor capacidade do modelo em simular o acúmulo de nitrogênio na parte aérea, devido à influência mais significativa do clima de curto prazo sobre essa parte da planta.

O acúmulo de N na parte aérea e no caule foi estimado com boa precisão (R^2 entre 0,73 e 0,86), boa acurácia (NSE de 0,58 a 0,83 e RSR de 0.39 a 0.61) e erros baixos (Figura 4c). Portanto, os resultados da calibração para as variáveis acúmulo de N no caule e na parte aérea indicaram claramente que o modelo APSIM é capaz de simular essas variáveis em uma faixa aceitável.

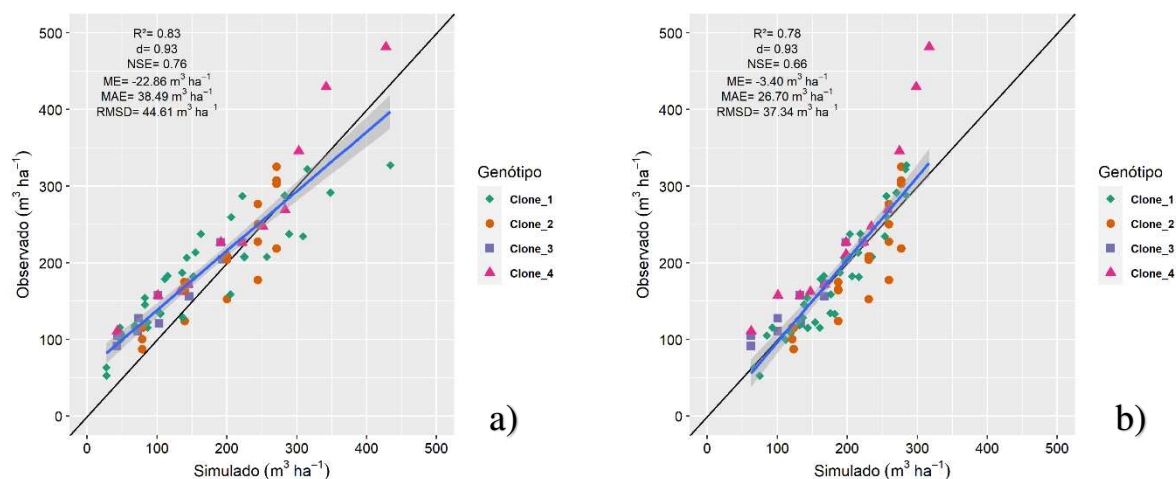
Figura 4 – Calibração do modelo *APSIM Next Generation Eucalyptus* para o conteúdo de N na parte aérea (a), conteúdo de N no caule (b), e avaliação do desempenho do conteúdo de N na parte aérea e caule (c), submetido aos tratamentos irrigado (I), fertirrigado (FI) e sem irrigação e fertirrigação (SFI) no período de agosto de 2002 até junho de 2008 no município de Santana do Paraíso, Brasil. N_CAULE: conteúdo de N no caule; N_PA: conteúdo de N na parte aérea. Linha sombreada representa o intervalo de 95% de confiança em torno da linha de regressão. R^2 , NSE, RSR, MAE, ME e RMSD representam o coeficiente de determinação, a eficiência de Nash Sutcliffe, a raiz do erro quadrático médio para a razão de desvio padrão, o erro absoluto médio, o erro médio e desvio da raiz quadrada média, respectivamente



3.2 Desempenho dos modelos 3-PG e APSIM *Next Generation Eucalyptus* na fase de validação

Para a validação dos modelos, foi incluído um conjunto de dados para avaliação independente, no qual a configuração do modelo foi baseada nos dados disponíveis e na experiência desenvolvida na fase de calibração. A comparação entre o volume de tronco observado e simulado foi realizado em regiões distintas, para quatro genótipos diferentes. Combinando todos os conjuntos de dados de teste, o desempenho do modelo APSIM foi muito bom para avaliar o volume de tronco com excelente concordância entre os dados e baixos erros $\leq 45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 5a), enquanto o modelo 3-PG (Figura 4b) teve desempenho 'bom', excelente concordância e baixos erros $\leq 40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Figura 5 – Validação dos modelos APSIM *Next Generation* (a) e 3-PG (b), prevendo o volume de tronco no conjunto de dados independentes para diferentes genótipos de *Eucalyptus* (Clone_1, Clone_2, Clone_3 e Clone_4) em diferentes regiões; R^2 , NSE, d, MAE, ME e RMSD representam o coeficiente de determinação, a eficiência de Nash Sutcliffe, o índice de concordância de Willmott, o erro absoluto médio, o erro médio e desvio da raiz quadrada média, respectivamente. Linha sombreada representa o intervalo de 95% de confiança em torno da linha de regressão



Para o modelo APSIM, as diferenças entre a calibração (Tabela 5, Figura 3) e validação (Figura 5a) foram baixas, confirmando a capacidade de simulação do modelo. Todavia, como na calibração, também foi observado uma subestimativa do modelo ao avaliar os dados independentes, com valor de $-22.86 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de subestimativa obtida pelo modelo.

A comparação entre o volume de tronco observado e simulado no presente estudo para o modelo APSIM mostrou coeficiente de determinação de 0.83, com valor de MAE $38 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e valor RMSD de $44 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 5a). As diferenças entre os valores simulados do APSIM e as observações de campo tiveram NSE variando de 0.58 e 0.95 (exceto para altura de plantas) entre a validação e a calibração, respectivamente (Tabela 5, Figura 3, Figura 5a). Esses valores refletem um bom desempenho do modelo aliado aos baixos valores de RSR obtidos.

O modelo 3-PG também foi eficiente na validação dos dados, como observado na Figura 5b. O coeficiente de determinação foi bom ($R^2 = 0.77$), acompanhado de NSE 0.66 ('bom'). Como no modelo APSIM (Figura 5a), o modelo 3-PG também apresentou uma subestimativa (Figura 5b), e erros levemente menores que os encontrados no APSIM, com MAE $< 30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e RMSD $< 40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

3.3 Desempenho dos modelos APSIM *Next Generation* e 3-PG avaliando individualmente os genótipos de *Eucalyptus*

Os índices estatísticos realizados por genótipos de *Eucalyptus* com o modelo APSIM apresentaram desempenho diferenciado para estimativas de produtividade na fase de validação, com precisão ($R^2 \geq 0.80$) e exatidão ($d \geq 0.88$) satisfatórias, levando em consideração os quatro (4) genótipos (Tabela 6). O MAE variou de 28.7 a $48.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ enquanto o RMSD variou de 33.5 a $54.15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Os resultados do modelo 3-PG, obtidos entre os diferentes genótipos, foram bons (Tabela 6), com coeficiente de determinação R^2 variando entre 0.77 a 0.90, e concordância de 0.87 a 0.96. Todavia, o genótipo Clone_4 apresentou uma maior penalização, a julgar pelo baixo NSE e elevado erros MAE e RMSD (40.86 e $61.60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente).

De maneira geral, é possível ver que para todos os genótipos de *Eucalyptus* em estudo, as simulações como o APSIM apresentaram uma subestimativa (Tabela 6). Porém, é notório que as simulações para os clones Clone_3 e Clone_4 foram as que apresentaram maiores subestimativas, com valores superiores a $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Todavia o modelo 3-PG apresentou resultados subestimados para os clones Clone_3 e Clone_4, e superestimados (Clone_1 e Clone_2).

Tabela 6 – Índices estatísticos e erros da relação entre o volume de caule observado e estimado de diferentes genótipos de *Eucalyptus* (Clone_1, Clone_2, Clone_3 e Clone_4) determinados pelo modelo APSIM durante a fase de validação

Genótipos	R ²	NSE	d	MAE	ME	RMSD
Validação APSIM				-----m ³ ha ⁻¹ -----		
Clone_1	0.82	0.75	0.91	48.77	-9.78	54.15
Clone_2	0.80	0.77	0.94	28.72	-9.08	33.53
Clone_3	0.93	0.58	0.88	33.21	-33.21	38.34
Clone_4	0.93	0.81	0.95	35.03	-32.78	42.35
Validação 3-PG						
Clone_1	0.89	0.84	0.96	20.72	3.18	24.52
Clone_2	0.77	0.52	0.90	31.87	19.47	38.62
Clone_3	0.90	0.82	0.95	18.44	-14.15	21.99
Clone_4	0.83	0.20	0.87	39.01	-39.01	60.27

R², NSE, d, MAE, ME e RMSD representam o coeficiente de determinação, a eficiência de Nash Sutcliffe, o índice de concordância de Willmott, o erro absoluto médio, o erro médio e desvio da raiz quadrada média, respectivamente.

3.4 Crescimento do volume de tronco e IMA ao longo do ciclo do *Eucalyptus*

O modelo APSIM e o 3-PG foram capazes de simular a produção florestal (volume do caule) em diferentes condições de clima e solo, bem como as diferenças entre os quatro genótipos avaliados na validação (Figura 6, Figura 8). Para o modelo APSIM, por exemplo, o clone Clone_1 atingiu valores observados de 227 m³ ha⁻¹ aos 7.09 anos de idade, com incremento médio anual de 31.9 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, no sítio Belo Oriente (BO), enquanto o simulado nesse mesmo período foi de 222 m³ ha⁻¹ aos 7.09 anos de idade, com incremento médio anual de 31.3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 7).

O genótipo Clone_4 também apresentou bom rendimento para o modelo APSIM, com volume de 482 m³ ha⁻¹ (Figura 6) aos 8.66 anos de idade (IMA = 55.57 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) nos dados observados para o sítio Santa Barbara (SB_2) enquanto o simulado foi de 427 m³ ha⁻¹ (IMA = 49.15 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) nesse mesmo período, ou seja, uma diferença de produção de 11.4%. Já o genótipo Clone_2, para o sítio Santa Barbara (SB_5) atingiu uma produção real de 308 m³ ha⁻¹ e simulado de 271 m³ ha⁻¹, com IMA de 42.9 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (observado) e 37.8 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (simulado), respectivamente (Figuras 6 e 7).

Figura 6 – Volume do caule observado e estimado ao longo do ciclo de diferentes genótipos de *Eucalyptus* (Clone_1, Clone_2, Clone_3 e Clone_4) pelo modelo APSIM *Next Generation* em locais com diferentes climas e tipos de solo. BO, BO_2, BO_3, BO_4 representam os respectivos sítios florestais 2, 3, 4 e 5; SDP, SDP_2, SDP_3, SDP_4 representam os respectivos sítios florestais 6, 7, 8 e 9; SB, SB_2, SB_3, SB_4, SB_5, SB_6 representam os respectivos sítios florestais 10, 11, 12, 14 e 15.

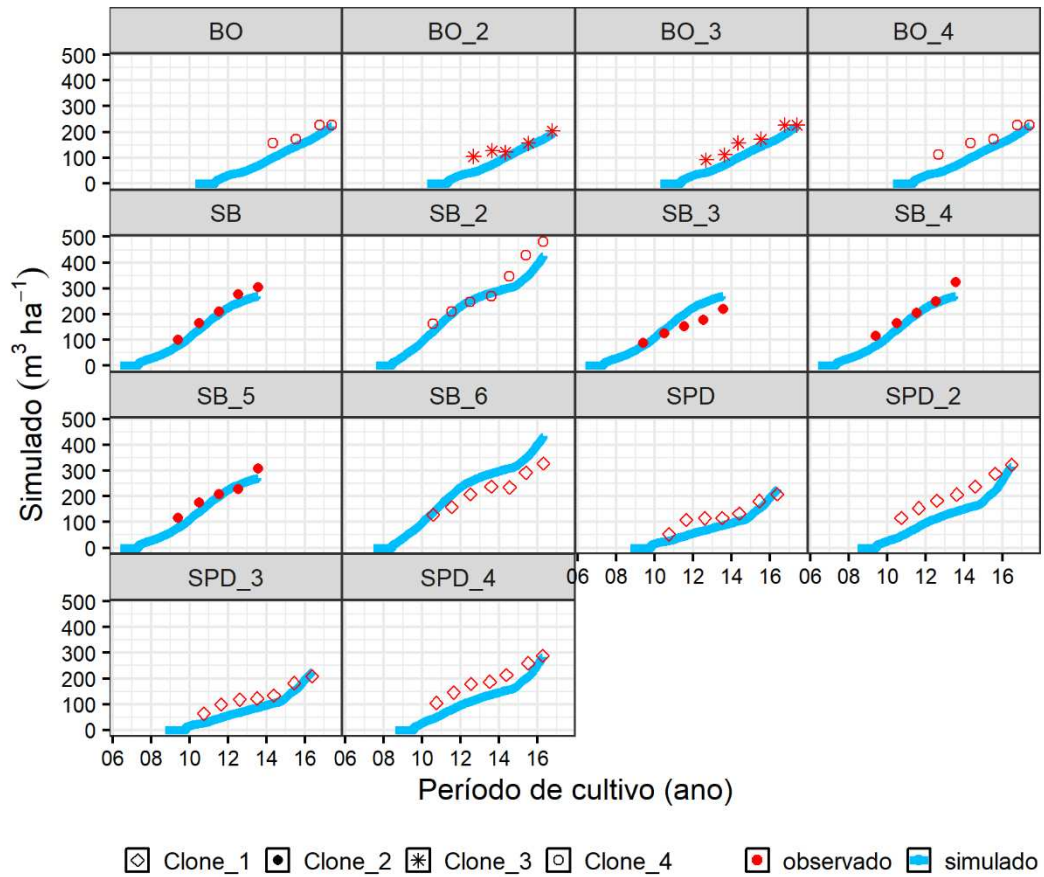
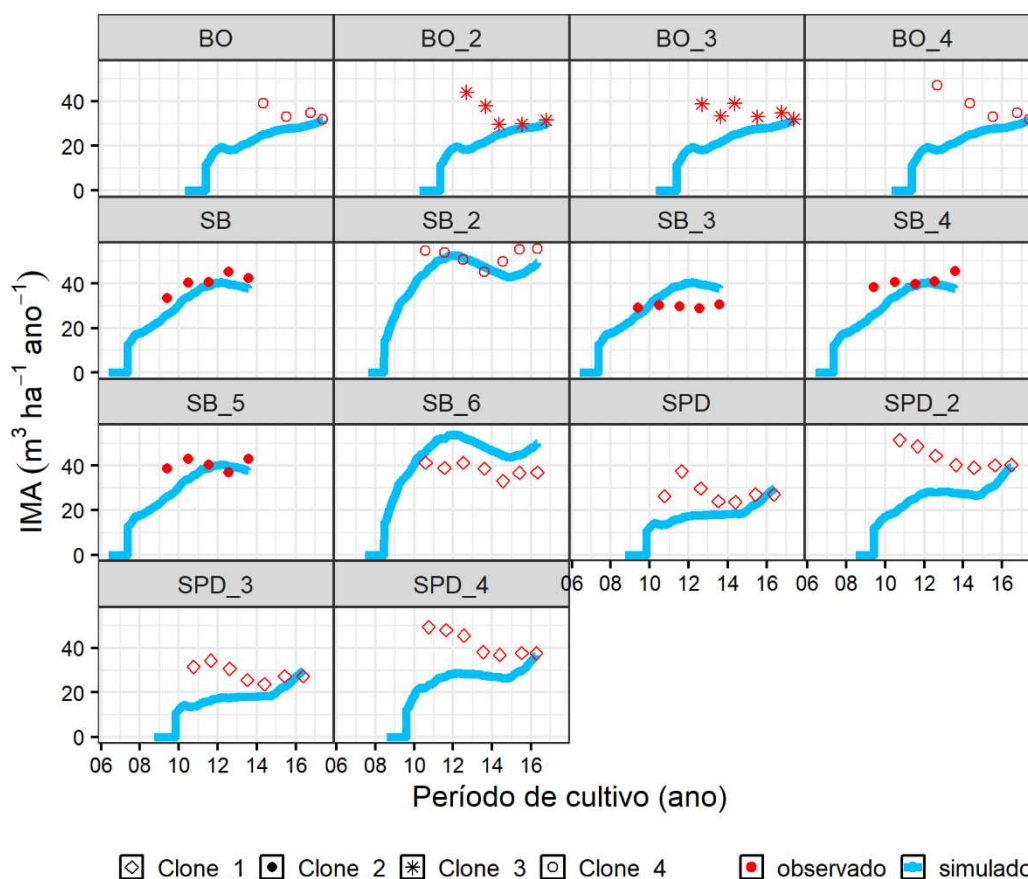
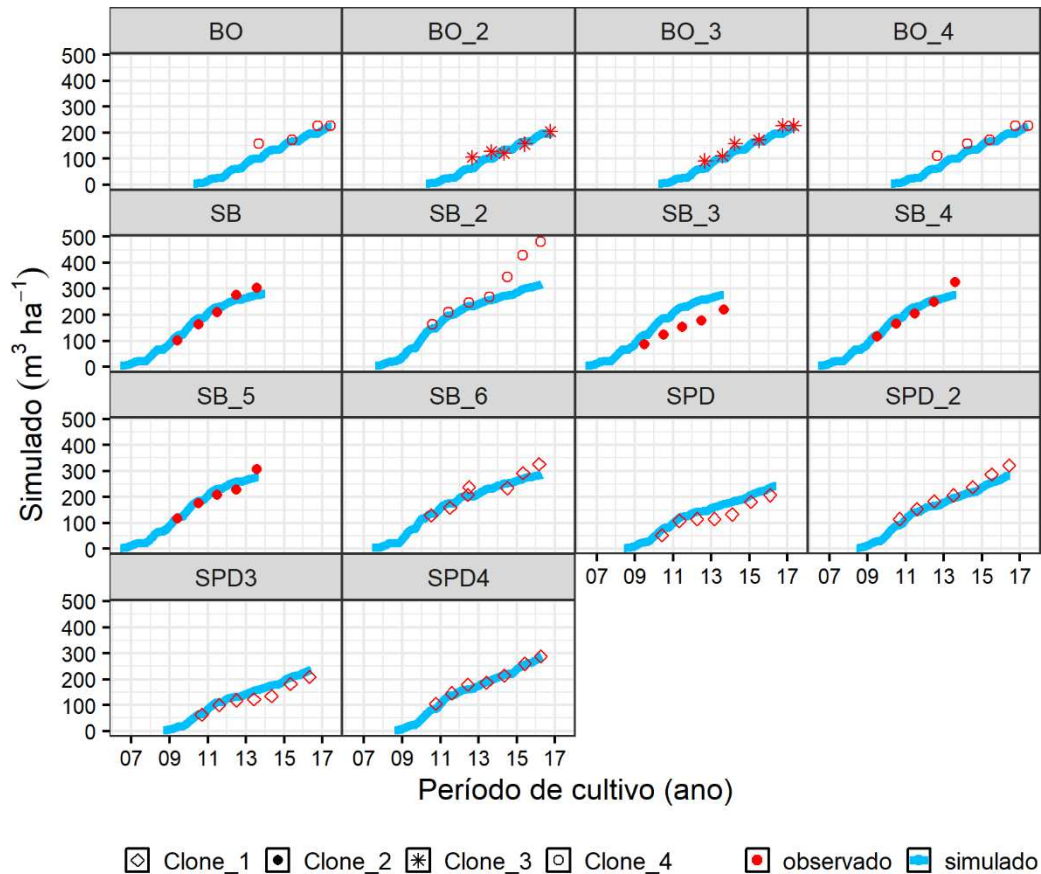


Figura 7 – Incremento médio anual – IMA observado e estimado ao longo do ciclo de diferentes genótipos de *Eucalyptus* (Clone_1, Clone_2, Clone_3 e Clone_4) pelo modelo APSIM *Next Generation* em locais com diferentes climas e tipos de solo. BO, BO_2, BO_3, BO_4 representam os respectivos sítios florestais 2, 3, 4 e 5; SDP, SDP_2, SDP_3, SDP_4 representam os respectivos sítios florestais 6, 7, 8 e 9; SB, SB_2, SB_3, SB_4, SB_5, SB_6 representam os respectivos sítios florestais 10, 11, 12, 14 e 15



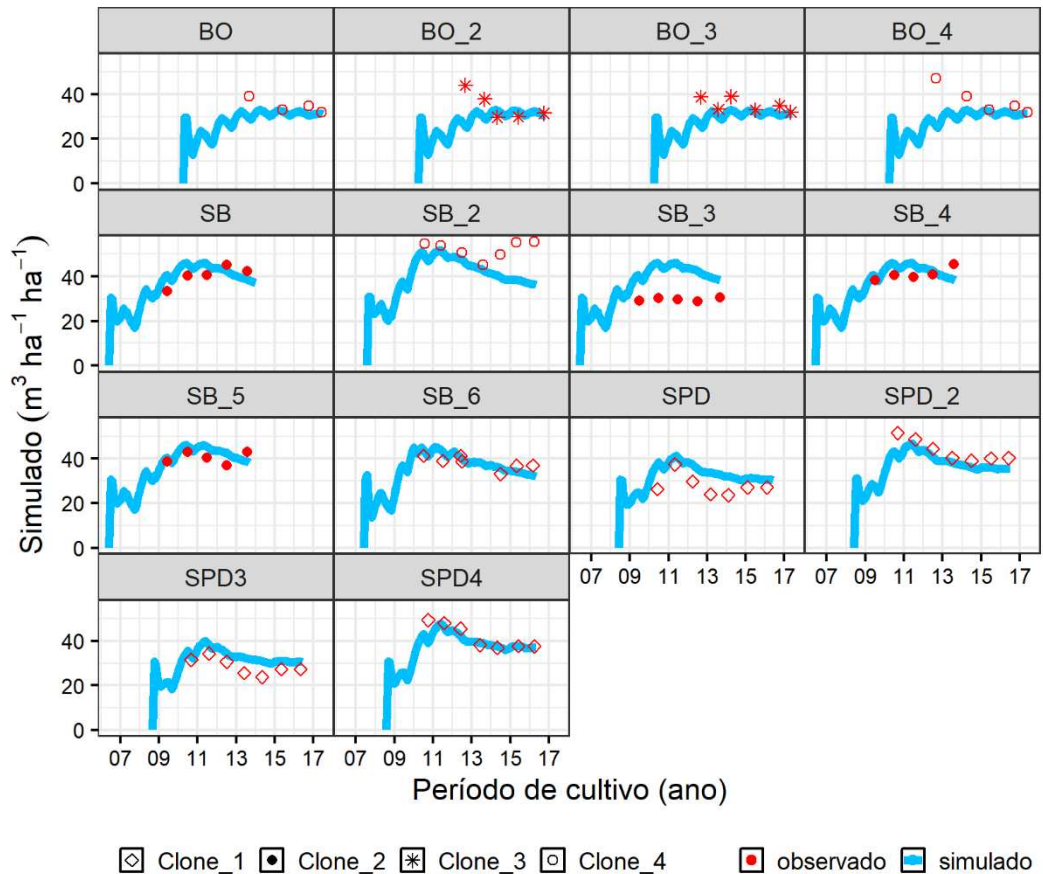
O modelo 3-PG foi eficaz nas simulações, como observado pelo genótipo Clone_1, que apresentou valores observados de $287.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aos 7.7 anos de idade (Figura 8), com incremento médio anual de $37.54 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Figura 9), no sítio SDP_4 (Nova Era), enquanto o simulado nesse mesmo período foi de $284.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aos 7.7 anos de idade, com incremento médio anual de $37.11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Figura 9). O genótipo Clone_1 no sítio florestal SB_6 teve um padrão de resposta bom até os 6 anos de plantio, todavia, a partir desse momento o modelo não conseguiu acompanhar o resultado observado em campo, se distanciando na produtividade e no IMA, com respectivos valores observados de $481.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $55.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto o simulado foi de $316.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $36.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente, aos 8.7 anos após o plantio.

Figura 8 – Volume do caule observado e estimado ao longo do ciclo de diferentes genótipos de *Eucalyptus* (Clone_1, Clone_2, Clone_3 e Clone_4) pelo modelo 3-PG em locais com diferentes climas e tipos de solo. BO, BO_2, BO_3, BO_4 representam os respectivos sítios florestais 2, 3, 4 e 5; SDP, SDP_2, SDP_3, SDP_4 representam os respectivos sítios florestais 6, 7, 8 e 9; SB, SB_2, SB_3, SB_4, SB_5, SB_6 representam os respectivos sítios florestais 10, 11, 12, 14 e 15



Outro aspecto importante a ser destacado é que na maioria dos casos os modelos em estudo apresentaram subestimativa do IMA no início do ciclo do *Eucalyptus*. Todavia, ao final, no período de corte, o IMA simulado conseguiu alcançar valores próximos aos obtidos no campo (Figura 7, Figura 9). De acordo com Elli et al. (2019) é importante avaliar os dados de campo em diferentes idades para construir uma curva de crescimento e não apenas utilizar o rendimento final. Isso ajuda os pesquisadores a identificar possíveis limitações dos modelos e corrigi-los.

Figura 9 – Incremento médio anual – IMA observado e estimado ao longo do ciclo de diferentes genótipos de *Eucalyptus* (Clone_1, Clone_2, Clone_3 e Clone_4) pelo modelo 3-PG em locais com diferentes climas e tipos de solo. BO, BO_2, BO_3, BO_4 representam os respectivos sítios florestais 2, 3, 4 e 5; SDP, SDP_2, SDP_3, SDP_4 representam os respectivos sítios florestais 6, 7, 8 e 9; SB, SB_2, SB_3, SB_4, SB_5, SB_6 representam os respectivos sítios florestais 10, 11, 12, 14 e 15



4 DISCUSSÃO

Os resultados da simulação com os modelos APSIM e 3-PG mostraram que ambos podem ser usados como ferramenta adequada para investigar o efeito da variabilidade edafoclimática no desenvolvimento e rendimento do eucalipto. Os índices de avaliação (Tabela 5, Figura 3c) confirmaram a robustez do APSIM para simular a biomassa acima do solo, IAF, DAP, eafTronco, conteúdo de N na parte aérea e no caule na calibração, bem como o volume de tronco e o IMA no período de corte, durante a validação (Figura 6, Figura 7). O modelo 3-PG também apresentou robustez em suas predições, sendo eficiente para simular a biomassa acima do solo, DAP, altura de planta e eafTronco (Tabela 5), bem como o volume de tronco e o IMA no período de corte, durante a validação (Figura 8, Figura 9).

Conforme explicado anteriormente, as calibrações dos modelos foram realizadas minimizando as diferenças entre as variáveis respostas (Figura 2, Figura 3), para três tratamentos distintos, I, FI e SFI. Os índices e erros estatísticos encontrados no presente estudo estão de acordo com outros estudos envolvendo modelos baseados em processos de *Eucalyptus* no Brasil e no mundo (Borges et al., 2012; Valadares et al., 2018; Elli et al., 2020b).

O índice de área foliar não foi tão preciso, porém, ainda mostrou resultados satisfatórios (Tabela 5), com coeficiente de determinação de 0.65, NSE de 0.60, RSR de 0.60 e MAE de $0.52 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para o modelo APSIM. O mesmo não foi observado para o 3-PG, que foi ineficiente para simular essa variável resposta, com coeficiente de determinação $R^2 = 0.04$, NSE de -0.80 e MAE de $1.04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Tabela 5). De acordo com Colmanetti et al. (2022), os ramos e o IAF variam muito entre os genótipos e locais e dificilmente podem ser previstos com uma parametrização genérica. Neste estudo, como os modelos foram calibrados visando uma cultura genérica, ou seja, utilizando a média de quatro (4) genótipos diferentes, o modelo pode ter penalizado nessa variável. Pode ser que uma calibração individual desses clones (57, 129, 2719 – *Eucalyptus grandis* e 1215 – híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, “urograndis”) apresentassem resultados mais satisfatórios para o IAF. De acordo com Smethurst et al. (2020), uma das dificuldades na criação de um modelo genérico de produtividade baseado em processo é que os genótipos não são uniformes, particularmente na alocação de C e N para os componentes da biomassa.

O modelo APSIM teve um desempenho fraco em prever adequadamente a altura de planta, e isso pode limitar seu uso quando essa for a variável desejada para a predição. Essa mesma limitação foi observada por Berghuijs et al. (2021) ao avaliar altura de trigo. Em

contraste com o modelo APSIM, o modelo 3-PG simulou bem a altura de planta como observado na Tabela 5. Isso pode estar relacionado à forma de obtenção de altura de planta pelo 3-PG, que foi estimado pela equação desenvolvida por Oliveira et al. (2018), com base no *output* DAP, obtido pelo 3-PG.

O conteúdo de N acumulado na parte aérea e no caule (Figura 4), obtido pelo APSIM, apresentou bons resultados, com baixos erros e índices estatísticos dentro do nível aceitável. É possível ainda perceber que entre ambos, o acúmulo de N no caule mostrou melhor desempenho na simulação. Isso possivelmente está relacionado à maior variação que o N pode ocorrer na parte aérea, notadamente nas folhas. O N acumulado na folha pode ser facilmente remobilizado para outras partes da planta sob condições adversas. De acordo com Fortunel et al. (2012), em comparação com caules ou raízes, as folhas são mais suscetíveis a estresses ambientais. Além disso, caules e raízes têm concentrações relativamente baixas de N e P em comparação com as folhas porque suas principais funções são absorver e transportar água e nutrientes para as folhas (Yang et al., 2014b). Portanto, são menos propensas à variabilidade, o que justifica uma predição melhor do acúmulo de N no caule.

A modelagem precisa do acúmulo de N é importante devido às implicações ambientais, podendo, por exemplo, ser utilizado para avaliar perdas por lixiviação, que ocorrem quando o N excede na quantidade, impactando negativamente a qualidade da água e contribuindo para a poluição hídrica. A taxa de aplicação de N exerce uma influência preponderante sobre o processo de lixiviação do N, sendo que a lixiviação do N apresenta incremento concomitante ao aumento das doses de aplicação de fertilizantes nitrogenados (Zhang et al., 2015; Wang et al., 2017; Xu et al., 2020). Além disso, a emissão de gases de efeito estufa, como o óxido nitroso, está intimamente ligada ao ciclo do nitrogênio, tornando a modelagem precisa fundamental para avaliar a pegada de carbono e mitigar as mudanças climáticas. Portanto, aprimorar a modelagem do acúmulo de N é crucial para promover a gestão agrícola sustentável e mitigar os impactos ambientais da agricultura.

A validação dos modelos APSIM e 3-PG apresentaram bons resultados para estimar a produção florestal, como observado na Figura 5, com concordância e desempenho muito bom. A partir da análise individual de cada clone, o ajuste da regressão mostrou resultados variando para os quatro genótipos em estudo.

Ao avaliar o NSE, que mostra o desempenho do modelo, o menor valor foi encontrado no genótipo Clone_3, com valor de 0.58 e concordância de 0.88 no APSIM, enquanto pelo 3-PG foi observado menor desempenho no genótipo Clone_4, com NSE 0.20 e concordância 0.87 (Tabela 6). Essa maior penalização pelo Clone_4 se deve, principalmente, ao padrão de

resposta encontrado no sítio SB_2, como visto pelas Figuras 8 e 9, no qual, a partir dos 7.1 anos de idade, o modelo não conseguiu simular adequadamente. Apesar disso, tanto o modelo APSIM como o 3-PG, conseguiram bons resultados para a maioria dos sítios florestais, para a produtividade e IMA, no período de corte da cultura, com resultados simulados muito próximos com os obtidos em campo.

Os modelos não puderam prever com precisão o comportamento do IMA ao longo do tempo para os diferentes genótipos entre os sítios florestais (Figura 7, Figura 9). Para o modelo 3-PG, as regiões com maior penalização foram BO, BO_2, BO_3, BO_4 que representam os respectivos sítios florestais 2, 3, 4 e 5. Essas regiões são caracterizadas por ter uma menor altitude e, conseqüentemente, maiores temperaturas, em conjunto com uma disponibilidade hídrica menor. Isso nos revela que, de alguma forma, em ambientes mais secos, ocorre uma maior penalização do modelo em simular o IMA, principalmente nas fases iniciais.

De modo geral, os resultados desse estudo demonstraram que ambos os modelos podem prever os efeitos da variabilidade do solo e do clima no desenvolvimento do eucalipto na calibração e validação. Apesar do modelo 3-PG ter menor sensibilidade no módulo solo que o APSIM, ele ainda foi capaz de simular com boa acurácia. Ambos os modelos possuem uma concepção semelhante em relação ao módulo clima e planta, todavia, o módulo solo dos dois modelos distingue-se, sendo que o APSIM possui uma maior sensibilidade e, conseqüentemente, pode apresentar maior acurácia nas simulações de crescimento e produtividade do eucalipto quando expostos a condições contrastantes de solo.

Este é um resultado importante, uma vez que simulações em diferentes condições edafoclimáticas, para avaliar os efeitos da variabilidade do clima e do solo na produtividade do eucalipto, podem auxiliar na busca do planejamento e manejo florestal adequado (Elli et al., 2017a, 2017b). Neste contexto, um modelo que represente de maneira eficiente as condições de solo, poderá lidar com uma maior acurácia na resposta das plantas aos impactos das mudanças climáticas, podendo dar ênfase, portanto, em estratégias para lidar com a variabilidade climática.

Apesar dos bons resultados obtidos, deve-se tomar cuidado para não extrapolar as recomendações de uso das calibrações atuais, visto que existe uma grande variedade de genótipos com características intrínsecas, bem como condições muito adversas de clima e solo, o que pode limitar consideravelmente a simulação. Outro ponto a ser destacado é que a flexibilidade do modelo APSIM, permitindo adicionar funções específicas, contribuiu de

maneira significativa aos bons resultados obtidos, como também observado por Gomes et al. (2020).

A abordagem desenvolvida nesta pesquisa demonstra que os modelos *APSIM Next Generation* e 3-PG são ferramentas importantes para determinar o padrão de resposta do eucalipto, desde que seja feito uma calibração e validação adequada aos genótipos em estudo, servindo de auxílio em aplicações futuras para melhorar a produtividade do sistema florestal. Também são observadas simulações ligeiramente melhores do modelo *APSIM* na calibração e validação, bem como na representação dos genótipos avaliados individualmente. Ambos os modelos podem ser usados para explorar a produtividade florestal em condições de mudanças climáticas futuras. Essa estratégia ajudaria os melhoristas a selecionar genótipos que poderiam se sobressair frente às mudanças climáticas (Zhao et al., 2020).

5 CONCLUSÃO

Os modelos de simulação APSIM *Next Generation* e 3-PG foram capazes de estimar a produção de eucalipto em condições contrastantes de climas e tipos de solo quando devidamente calibrados e avaliados.

Os modelos de crescimento de culturas são uma importante ferramenta para explorar o desempenho de genótipos de eucalipto, escolhas de manejo, sob diferentes condições edafoclimáticas.

Os modelos APSIM e 3-PG podem ser valiosas ferramentas de apoio à decisão para auxiliar silvicultores na adequação de genótipos adequados aos locais, bem como no desenvolvimento de estratégias de manejo e pesquisas sobre o rendimento potencial da produtividade de eucalipto.

6 REFERÊNCIAS

- Almeida, A. C., Landsberg, J. J., & Sands, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 179-195, 2004
- Attia, A., El-Hendawy, S., Al-Suhaibani, N., Tahir, M. U., Mubushar, M., dos Santos Vianna, M., ... & Datta, A. Sensitivity of the DSSAT model in simulating maize yield and soil carbon dynamics in arid Mediterranean climate: Effect of soil, genotype and crop management. **Field crops research**, v. 260, p. 107981, 2021.
- Augustynczyk, A. L., Hartig, F., Minunno, F., Kahle, H. P., Diaconu, D., Hanewinkel, M., & Yousefpour, R. Productivity of *Fagus sylvatica* under climate change—A Bayesian analysis of risk and uncertainty using the model 3-PG. **Forest Ecology and Management**, v. 401, p. 192-206, 2017.
- Barros, N.F.; Novais, R.F.; Teixeira, J.L. & Fernandes Filho, E.I. NUTRICALC 2.0 - Sistema para calculo del balance nutricional y recomendacion de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. *Bosque*, 16:129-131, 1995.
- Berghuijs, H. N., Weih, M., van der Werf, W., Karley, A. J., Adam, E., Villegas-Fernández, Á. M., ... & Vico, G. Calibrating and testing APSIM for wheat-faba bean pure cultures and intercrops across Europe. **Field Crops Research**, v. 264, p. 108088, 2021.
- Borges J. S. Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto [tese]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2012.
- Borges, J. S., Neves, J. C. L., Lourenço, H. M., Barros, N. F. D., & Dias, S. C. M. Parameterization of the 3-PG model for eucalypt in the region of Cerrado in Minas Gerais State. *Ciência Florestal*, v. 22, p. 567-578, 2012.
- Brown, H. E., Huth, N. I., Holzworth, D. P., Teixeira, E. I., Zyskowski, R. F., Hargreaves, J. N., & Moot, D. J. Plant modelling framework: software for building and running crop models on the APSIM platform. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 385-398, 2014.
- Brown, H., Huth, N., & Holzworth, D. Crop model improvement in APSIM: using wheat as a case study. **European Journal of Agronomy**, v. 100, p. 141-150, 2018.
- Bryars, C., Maier, C., Zhao, D., Kane, M., Borders, B., Will, R., & Teskey, R. Fixed physiological parameters in the 3-PG model produced accurate estimates of loblolly pine growth on sites in different geographic regions. **Forest ecology and management**, v. 289, p. 501-514, 2013.
- Carvalho, M. A. F., Pinto, I. O., Sarmiento, M. I., Carvalho, P. H. N., da Silva, R. S., Rocha, J. P. L., & Sarmiento, R. A. Assessment performance of *Eucalyptus* clones attacked by the recent invasion of *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae): implications to invasion pest management. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, p. 101939, 2022.

Chibarabada, T. P., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 281, p. 107850, 2020.

Dawson, C. W., Abrahart, R. J., & See, L. M. HydroTest: a web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 7, p. 1034-1052, 2007. (2007)

E.F. Elli, P.C. Sentelhas, C.H. Freitas. ***Eucalyptus for energy: assessment of long-term yield simulations to improve forest planning and management*** Brazilian Bioenergy Science And Technology Conference, Campos do Jordão, SP, Brazil (2017b) pp. 93–93.

Ebrahimi-Mollabashi, E., Huth, N. I., Holzwoth, D. P., Ordóñez, R. A., Hatfield, J. L., Huber, I., ... & Archontoulis, S. V. Enhancing APSIM to simulate excessive moisture effects on root growth. **Field Crops Research**, v. 236, p. 58-67, 2019.

Elli, E. F., Caron, B. O., Behling, A., Eloy, E., Queiróz De Souza, V., Schwerz, F., & Stolzle, J. R. Climatic factors defining the height growth curve of forest species. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 10, n. 3, p. 547, 2017a.

Elli, E. F., Huth, N., Sentelhas, P. C., Carneiro, R. L., & Alvares, C. A. Ability of the APSIM Next Generation Eucalyptus model to simulate complex traits across contrasting environments. **Ecological Modelling**, v. 419, p. 108959, 2020b.

Elli, E. F., Sentelhas, P. C., & Bender, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, 2020a.

Elli, E. F., Sentelhas, P. C., de Freitas, C. H., Carneiro, R. L., & Alvares, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, v. 450, p. 117493, 2019.

EMBRAPA - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre: SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT, 2004. 400 p.

Falconnier, G. N., Journet, E. P., Bedoussac, L., Vermue, A., Chlebowski, F., Beaudoin, N., & Justes, E. Calibration and evaluation of the STICS soil-crop model for faba bean to explain variability in yield and N₂ fixation. **European Journal of Agronomy**, v. 104, p. 63-77, 2019.

Forrester, D. I., Trotsiuk, V., & Mathys, A. S. 3-PG: ein physiologisches Waldwachstumsmodell. **Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen**, v. 171, n. 3, p. 158-164, 2020.

Fortunel, C., Fine, P. V., & Baraloto, C. Leaf, stem and root tissue strategies across 758 N eotropical tree species. **Functional Ecology**, v. 26, n. 5, p. 1153-1161, 2012.

Holzworth, D. P., Huth, N. I., & deVoil, P. G. Simple software processes and tests improve the reliability and usefulness of a model. **Environmental modelling & software**, v. 26, n. 4, p. 510-516, 2011.

Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., ... & Keating, B. A. APSIM–evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 327-350, 2014.

Holzworth, D., Huth, N. I., Fainges, J., Brown, H., Zurcher, E., Cichota, R., ... & Snow, V. APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. **Environmental Modelling & Software**, v. 103, p. 43-51, 2018.

Huth, N. I., Snow, V. O., & Keating, B. A. Integrating a forest modelling capability into an agricultural production systems modelling environment-current applications and future possibilities. Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation, **Canberra, Australia**, pp. 1895-1900, 2001.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Annual Report 2019. Brasília: **IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores**, 2019. 80p.

J., Bosi, C., Pedreira, B. C., Santos, P. M., & Pedreira, C. G. S. Parameterization of the APSIM model for simulating palisadegrass growth under continuous stocking in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural systems**, v. 184, p. 102876, 2020.

Jing, Q., Qian, B., Bélanger, G., VanderZaag, A., Jégo, G., Smith, W., ... & Hoogenboom, G. Simulating alfalfa regrowth and biomass in eastern Canada using the CSM-CROPGRO-perennial forage model. **European Journal of Agronomy**, v. 113, p. 125971, 2020.

Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., ... & Wheeler, T. R. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. **Agricultural systems**, v. 155, p. 269-288, 2017.

Khaembah, E. N., Brown, H. E., Zyskowski, R., Chakwizira, E., de Ruiter, J. M., & Teixeira, E. I. Development of a fodder beet potential yield model in the next generation APSIM. **Agricultural systems**, v. 158, p. 23-38, 2017.

Landsberg, J. J., & Waring, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest ecology and management**, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.

Landsberg, J. J., Waring, R. H., & Coops, N. C. The 3-PG forest model: matters arising from evaluation against plantation data from different countries. **Models for the Sustainable Management of Temperate Plantation Forests**, p. 31, 2001.

Mamassi, A., Marrou, H., El Gharous, M., Wellens, J., Jabbour, F. E., Zeroual, Y., ... & Tychon, B. Relevance of soil fertility spatial databases for parameterizing APSIM-wheat crop model in Moroccan rainfed areas. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 5, p. 1-16, 2022.

Morel, J., Parsons, D., Halling, M. A., Kumar, U., Peake, A., Bergkvist, G., ... & Hetta, M. Challenges for simulating growth and phenology of silage maize in a Nordic climate with APSIM. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 645, 2020.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

Oliveira, C. M. M. D., Delgado, R. C., Araújo, E. J. G. D., Almeida, A. Q. D., Rosa, T. C., & Oliveira Júnior, J. F. D. Modelo 3-pg na previsão do potencial produtivo de áreas para plantios comerciais de Eucalyptus spp. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 249-262, 2018.

Rua, J. C., Barreiro, S., Branco, M., & Tomé, M. Estimating defoliation impact of *Gonipterus platensis* on *Eucalyptus globulus* stands productivity using a forest simulator based on 3-PG. **Forest Ecology and Management**, v. 478, p. 118495, 2020.

Saddique, Q., Ji, J., Ajaz, A., Jiatun, X., Yufeng, Z., He, J., & Cai, H. Performance Comparison of the APSIM and CERES-Wheat models in Guanzhong Plain, China. In: **2019 ASABE Annual International Meeting**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019. p. 1.

Sales, R. A., Xavier, A. C., Oliveira, E. C., Oliveira, F. L., da Silva, D. M. N., & da Silva Berilli, S. Calibration and validation of FAO-AquaCrop model to estimate the total biomass and yacon root yield. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 13, n. 3, p. 123-128, 2020.

Sands, P. J., & Landsberg, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1-3, p. 273-292, 2002.

Setiyono, T. D., Weiss, A., Specht, J., Bastidas, A. M., Cassman, K. G., & Dobermann, A. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field crops research**, v. 100, n. 2-3, p. 257-271, 2007.

Silva, G. C. C., Neves, J. C. L., Marcatti, G. E., Soares, C. P. B., Calegario, N., Júnior, C. A. A., ... & Leite, H. G. Improving 3-PG calibration and parameterization using artificial neural networks. **Ecological Modelling**, v. 479, p. 110301, 2023.

Smethurst, P. J., Huth, N. I., Masikati, P., Sileshi, G. W., Akinnifesi, F. K., Wilson, J., & Sinclair, F. Accurate crop yield predictions from modelling tree-crop interactions in gliricidia-maize agroforestry. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 70-77, 2017.

Smethurst, P. J., Valadares, R. V., Huth, N. I., Almeida, A. C., Elli, E. F., & Neves, J. C. Generalized model for plantation production of *Eucalyptus grandis* and hybrids for genotype-site-management applications. **Forest ecology and management**, v. 469, p. 118-164, 2020.

Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., Fonseca, S., Loos, R. A., Takahashi, E. N., ... & Azevedo, M. R. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.

Tomasella, J., Y.A. Pachepsky, S. Crestana, W.J. Rawls. Comparison of two approximation techniques to develop pedotransfer functions for Brazilian soil. **Soil Science Society of American Journal**. Madson, v.67, p.1085-1092, 2003.

Trotsiuk, V., Hartig, F., & Forrester, D. I. r3PG—An R package for simulating forest growth using the 3-PG process-based model. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 11, n. 11, p. 1470-1475, 2020.

Valadares, R. V., Neves, J. C. L., Costa, M. D., Smethurst, P. J., Peternelli, L. A., Jesus, G. L., ... & Silva, I. R. Modeling rhizosphere carbon and nitrogen cycling in Eucalyptus plantation soil. **Biogeosciences**, v. 15, n. 16, p. 4943-4954, 2018.

Wang, H., Zhang, Y., Chen, A., Liu, H., Zhai, L., Lei, B., & Ren, T. An optimal regional nitrogen application threshold for wheat in the North China Plain considering yield and environmental effects. **Field Crops Research**, v. 207, p. 52-61, 2017.

Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., ... & Rowe, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

Xu, J., Cai, H., Wang, X., Ma, C., Lu, Y., Ding, Y., ... & Saddique, Q. Exploring optimal irrigation and nitrogen fertilization in a winter wheat-summer maize rotation system for improving crop yield and reducing water and nitrogen leaching. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105904, 2020.

Yang, J. M., Yang, J. Y., Liu, S., & Hoogenboom, G. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. **Agricultural Systems**, v. 127, p. 81-89, 2014.

Yang, X., Brown, H. E., Teixeira, E. I., & Moot, D. J. Development of a lucerne model in APSIM next generation: 1 phenology and morphology of genotypes with different fall dormancies. **European Journal of Agronomy**, v. 130, p. 126372, 2021.

Yang, X., Tang, Z., Ji, C., Liu, H., Ma, W., Mohhamot, A., ... & Zheng, C. Scaling of nitrogen and phosphorus across plant organs in shrubland biomes across Northern China. **Scientific reports**, v. 4, n. 1, p. 1-7, 2014b.

Zhang, Y., Lu, D., Jiang, X., Li, Y., & Li, D. Forest Structure Simulation of Eucalyptus Plantation Using Remote-Sensing-Based Forest Age Data and 3-PG Model. **Remote Sensing**, v. 15, n. 1, p. 183, 2023.

Zhang, Y., Wang, H., Liu, S., Lei, Q., Liu, J., He, J., ... & Liu, H. Identifying critical nitrogen application rate for maize yield and nitrate leaching in a Haplic Luvisol soil using the DNDC model. **Science of the Total Environment**, v. 514, p. 388-398, 2015.

Zhao, P., Zhou, Y., Li, F., Ling, X., Deng, N., Peng, S., & Man, J. The adaptability of APSIM-Wheat model in the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain of China: a case study of winter wheat in Hubei Province. **Agronomy**, v. 10, n. 7, p. 981, 2020.

Zhu, J., Parker, A., Gou, F., Agnew, R., Yang, L., Greven, M., ... & Brown, H. E. Developing perennial fruit crop models in APSIM Next Generation using grapevine as an example. **in silico Plants**, v. 3, n. 2, p. diab021, 2021.

Zizinga, A., Mwanjalolo, J. G. M., Tietjen, B., Bedadi, B., Amaro de Sales, R., & Beesigamukama, D. Productivity under Selected Climate Smart Agriculture Practices Using AquaCrop Model in a Sub-humid Environment. **Sustainability**, v. 14, n. 4, p. 2036, 2022.

SUPLEMENTAR S1

[Leaf].Photosynthesis.RUE.FixedValue = 1.5

[Leaf].SpecificLeafAreaFunction.SpecificLeafAreaPot.XYPairs.X= 0, 1, 2, 3, 4, 80

[Leaf].SpecificLeafAreaFunction.SpecificLeafAreaPot.XYPairs.Y= 0.016, 0.016, 0.010, 0.009, 0.009, 0.010

[Leaf].DMDemands.Structural.DMDemandFunction.PartitionFraction.XYPairs.X=0, 1000, 10000, 25000, 40000, 80000

[Leaf].DMDemands.Structural.DMDemandFunction.PartitionFraction.XYPairs.Y=0.24, 0.15, 0.14, 0.20, 0.13, 0.082

[Stem].DMDemands.Structural.DMDemandFunction.PartitionFraction.XYPairs.X=0,2000,10000

[Stem].DMDemands.Structural.DMDemandFunction.PartitionFraction.XYPairs.Y=0.25,0.60, 0.64

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no 3-PG

Valiáveis	Name	Units	Valo
Allometric relationships & partitioning			
Foliage:stem partitioning ratio @ D=2 cm	pFS2	-	1.30
Foliage:stem partitioning ratio @ D=20 cm	pFS20	-	0.15
Constant in the stem mass v. diam. relationship	aS	-	0.02
Power in the stem mass v. diam. relationship	nS	-	3.03
Maximum fraction of NPP to roots	pRx	-	0.80
Minimum fraction of NPP to roots	pRn	-	0.14
Litterfall & root turnover			
Maximum litterfall rate	gammaFx	1/month	0.07
Litterfall rate at t = 0	gammaF0	1/month	0.00
Age at which litterfall rate has median value	tgammaF	months	4.00
Average monthly root turnover rate	gammaR	1/month	0.03
NPP & conductance modifiers			
Temperature modifier (fT)			
Minimum temperature for growth	Tmin	deg. C	8.00
Optimum temperature for growth	Topt	deg. C	20.00
Maximum temperature for growth	Tmax	deg. C	40.00
Frost modifier (fFRost)			
Days production lost per frost day	kF	days	0.00
Soil water modifier (fSW)			
Moisture ratio deficit for $f_{\square} = 0.5$	SWconst	-	0.70
Power of moisture ratio deficit	SWpower	-	9.00
Atmospheric CO2 modifier (fCO2)			
Assimilation enhancement factor at 700 ppm	fCalpha700	-	1.40

Canopy conductance enhancement factor at 700 ppm	fCg700	-	0.70
Fertility effects			
Value of 'm' when FR = 0	m0	-	0.00
Value of 'fNutr' when FR = 0	fN0	-	0.50
Power of (1-FR) in 'fNutr'	fNn	-	1.00
Age modifier (fAge)			
Maximum stand age used in age modifier	MaxAge	years	9.00
Power of relative age in function for fAge	nAge	-	4.00
Relative age to give fAge = 0.5	rAge	-	0.95
Stem mortality & self-thinning			
Mortality rate for large t	gammaNx	%/year	0.00
Seedling mortality rate (t = 0)	gammaN0	%/year	0.00
Age at which mortality rate has median value	tgammaN	years	2.00
Shape of mortality response	ngammaN	-	1.00
Max. stem mass per tree @ 1000 trees/hectare	wSx1000	kg/tree	300.0 0
Power in self-thinning rule	thinPower	-	1.50
Fraction mean single-tree foliage biomass lost per dead tree	mF	-	0.00
Fraction mean single-tree root biomass lost per dead tree	mR	-	0.20
Fraction mean single-tree stem biomass lost per dead tree	mS	-	0.20
Canopy structure and processes			
Specific leaf area			
Specific leaf area at age 0	SLA0	m ² /kg	13.74
Specific leaf area for mature leaves	SLA1	m ² /kg	7.56
Age at which specific leaf area = (SLA0+SLA1)/2	tSLA	years	1.23
Light interception			
Extinction coefficient for absorption of PAR by canopy	k	-	0.60
Age at canopy cover	fullCanAge	years	2.08
Maximum proportion of rainfall evaporated from canopy	MaxIntcptn	-	0.15
LAI for maximum rainfall interception	LAImaxIntcptn	-	3.33
Production and respiration			
Canopy quantum efficiency	alpha	molC/molPAR	0.08
Ratio NPP/GPP	Y	-	0.50
Conductance			
Minimum canopy conductance	MinCond	m/s	0.00
Maximum canopy conductance	MaxCond	m/s	0.02
LAI for maximum canopy conductance	LAIgcx	-	3.33
Defines stomatal response to VPD	CoeffCond	1/mBar	0.03
Canopy boundary layer conductance	BLcond	m/s	0.20
Branch and bark fraction (fracBB)			
Branch and bark fraction at age 0	fracBB0	-	0.59

Branch and bark fraction for mature stands	fracBB1	-	0.11
Age at which fracBB = (fracBB0+fracBB1)/2	tBB	years	1.35
Basic Density			
Minimum basic density - for young trees	rhoMin	t/m3	0.38
Maximum basic density - for older trees	rhoMax	t/m3	0.51
Age at which rho = (rhoMin+rhoMax)/2	tRho	years	2.26
Stem height			
Constant in the stem height relationship	aH	-	0.60
Power of DBH in the stem height relationship	nHB	-	1.27
Power of stocking in the stem height relationship	nHN	-	0.00
Stem volume			
Constant in the stem volume relationship	aV	-	0.23
Power of DBH in the stem volume relationship	nVB	-	2.40
Power of stocking in the stem volume relationship	nVN	-	0.00
Conversion factors			
Intercept of net v. solar radiation relationship	Qa	W/m2	90.00
Slope of net v. solar radiation relationship	Qb	-	0.80
Molecular weight of dry matter	gDM_mol	gDM/mol	24.00
Conversion of solar radiation to PAR	molPAR_MJ	mol/MJ	2.30

ARTIGO II

AVALIAÇÃO DO *YIELD GAP* PARA A CULTURA DO EUCALIPTO EM REGIÕES DE MINAS GERAIS, BRASIL

RESUMO

O eucalipto é o tipo de árvore mais plantado no mundo. Considera-se uma fonte de biomassa barata, renovável e ecologicamente correta para a produção de materiais de alto valor. No Brasil, essa árvore apresenta grande apreço comercial, tendo Minas Gerais como o estado que possui a maior área plantada com espécies deste gênero. Como nas demais espécies de árvores, a produtividade do eucalipto também é influenciada diretamente pelas condições edafoclimáticas e de manejo florestal, bem como dos clones cultivados. Portanto, torna-se importante conhecer os fatores que condicionam e reduzem o crescimento e a produtividade das florestas. Quantificar as quebras de rendimento (*yield gaps*) e identificar práticas de manejo adequadas é fundamental para sustentar sistemas de produção agrícola, e nos fornece base para identificar as principais causas das perdas de produção. Desta forma, o objetivo deste estudo foi identificar a magnitude e as principais causas das perdas de rendimento para o eucalipto em diferentes regiões produtoras do estado de Minas Gerais. Para isso, foram utilizados dados de produtividade de eucalipto de 13 sítios florestais, localizados na região do Vale do Rio Doce, estado de Minas Gerais, variando entre o período de 2006 a 2017. Os dados climáticos foram obtidos por meio de estações meteorológicas automáticas próximas aos experimentos. Os rendimentos potenciais (Y_p) e atingíveis (Y_a) foram estimadas pelo modelo APSIM devidamente calibrado e validado para a cultura do eucalipto. Foram calculados os três tipos de quebras de produtividade: total (QTOTAL); devido à deficiência hídrica (QDEF); e devido ao déficit de manejo florestal (QMAN). Nos 13 sítios avaliados, a deficiência hídrica foi o principal fator de quebra de produtividade, correspondendo a 69.7% da QTOTAL, enquanto que as perdas decorrentes do manejo florestal subótimo corresponderam a 30.3% da QTOTAL. Isso indica que são necessários clones mais tolerantes a seca, acompanhado de um ajuste fino nas práticas de manejo, reduzindo as lacunas de rendimento nos sistemas agrícolas estudados.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o crescente interesse da população por recursos naturais renováveis tem aumentado, devido ao problema cada vez maior de desmatamento associado com a exploração intensiva dos recursos naturais. Neste contexto, a conscientização da população pela sustentabilidade ambiental, visando a mitigação de riscos e consequências negativas ao meio ambiente, tem contribuído para a redução dos efeitos negativos ao meio ambiente, através da adoção de tecnologias e práticas de manejo inteligentes na agricultura.

O eucalipto é uma das espécies que possui um alto potencial para atender a demanda por recursos naturais renováveis (Elli et al., 2019). Isso está atrelado ao fato de sua utilização para produção de celulose e papel (Paula et al., 2020), carvão vegetal (Santos et al., 2020), indústria madeireira (Thavamanikumar et al., 2020), perfumaria e farmacologia (Salehi et al., 2019) entre outros seguimentos.

O eucalipto é um grupo de espécies de árvores nativas da Austrália, mas amplamente cultivadas em todo o mundo. O gênero *Eucalyptus* que pertence à família Myrtaceae, é uma das espécies arbóreas dominantes e com maior potencial no mundo, no qual inclui mais de 700 espécies (Cheng et al., 2009; Mengistu et al., 2022).

No Brasil, o reflorestamento com eucalipto é a principal fonte de matéria-prima para produção de madeira, celulose, papel, carvão vegetal e lenha (Hoogar et al., 2019). Uma das regiões do Brasil com grande importância na produção de eucalipto é o estado de Minas Gerais, possuindo uma grande extensão territorial e grande variabilidade climática devido à complexa topografia, sendo o maior produtor do país, com aproximadamente 29.7% de todas as plantações (Ibá Relatório Indústria Brasileira de Árvores, 2022).

A produtividade da madeira, bem como suas características, é resultado da interação genética com o gradiente climático, insumos disponíveis (Nabais et al., 2018; Rocha et al., 2020) e das características edáficas. Portanto, essas características citadas governam a produtividade florestal, podendo levar a altos ou baixos rendimentos.

Esses baixos rendimentos por diversas causas são conhecidos como “*Yield Gap*”, que é um conceito amplamente abordado e que visa identificar as principais causas que limitam a produção (Elli et al. 2019). A avaliação do *yield gap* (Yg) fornece os meios para estimar esse potencial de produção inexplorado, estimando a diferença entre os rendimentos agrícolas atuais e o rendimento potencial (Van Ittersum et al., 2013).

A base do conceito de Yg é, portanto, os diferentes tipos de rendimento, classificados como rendimento potencial (Yp), rendimento atingível (Ya) e rendimento real (Yr), conforme

apresentado por Van Ittersum e Rabbinge (1997) e por Lobell et al. (2009). O Y_p é o rendimento máximo que pode ser obtido por uma cultura adaptada quando cultivada em condições não limitantes de água e nutrientes, ervas daninhas, patógenos e insetos praga, sendo determinado pela radiação solar, temperatura, fotoperíodo, CO_2 atmosférico e atributos fisiológicos da cultura (Evans, 1993; Van Ittersum & Rabbinge, 1997; Agus et al., 2019). O Y_a representa o rendimento máximo a ser alcançado pela floresta influenciada pelo déficit hídrico (fator limitante), além dos fatores determinantes, considerando condições ótimas de manejo (Freitas et al., 2021). Deste modo, para a obtenção do Y_g , é necessário conhecer a diferença entre Y_p ou Y_a e o rendimento real no nível de campo (Y_r), para condições irrigadas ou de sequeiro, respectivamente (Rizzo et al., 2021).

Conhecendo o Y_p e Y_a , para cada sítio de produção, é possível que os agricultores selecionem técnicas que possibilitem uma maximização em sua produtividade, independente da cultura avaliada. Estudos anteriores sobre a análise de Y_g para diversas espécies foram realizados em muitos países ao redor do mundo (Woittiez et al., 2017; Freitas et al., 2021; Bazkiaee et al., 2022; Yuan et al., 2022; Yu et al., 2022).

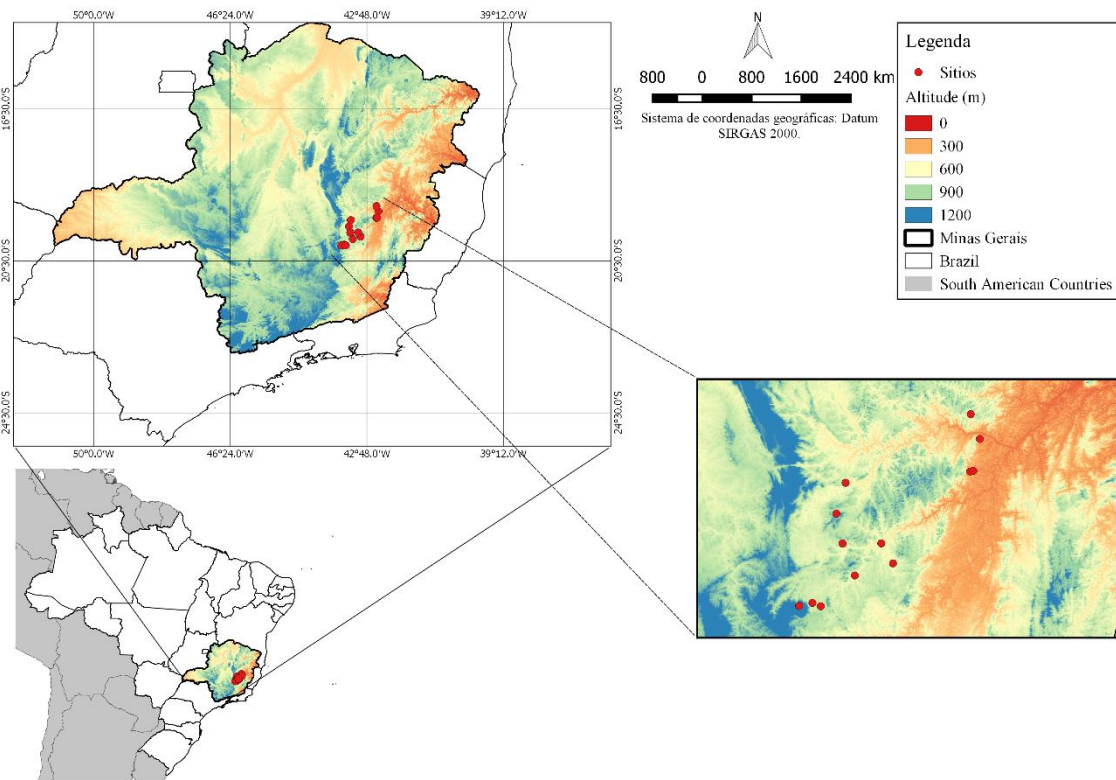
Existe uma necessidade de estudos que avaliem Y_g entre regiões, estações e ecossistemas de cultivo para orientar a tomada de decisões em nível local (Stuart et al., 2016). Portanto, o objetivo deste estudo foi quantificar o Y_p da cultura do eucalipto, usando o modelo de simulação *APSIM Next Generation*, e explorar os Y_g 's comparando o rendimento potencial com os reais obtidos no nível de campo. Além disso, espera-se que a combinação de abordagens e diferentes níveis de análise possam identificar o possível grau de melhoria de rendimento atingível em Minas Gerais, Brasil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de estudo

Os sítios florestais empregados neste estudo pertencem a uma empresa florestal com plantios na região do Vale do Rio Doce, Minas Gerais (Figura 1), em regiões contrastantes. Foram utilizados dados reais de produção (volume de tronco, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) de 13 sítios florestais. Esses dados foram obtidos a partir de diferentes clones de *Eucalyptus* (Tabela 1).

Figura 1 – Sítios produtores de eucalipto utilizados nas estimativas das quebras de rendimento em regiões do estado de Minas Gerais, Brasil



Os dados de produção foram obtidos no período de 2006 a 2017, variando de acordo com cada sítio, e os espaçamentos médios de plantio sendo de 3 x 3 m.

Tabela 1 – Descrição dos experimentos e estações meteorológicas

Sítio	Latitude S	Longitude W	Genótipo	Plantio	Colheita	Município
1	19° 55' 35"	43° 10' 10"	Clone_8	06/20/2007	04/25/2016	Rio Piracicaba
2	19° 35' 35"	43° 16' 10"	Clone_8	06/20/2007	04/25/2016	Rio Piracicaba
3	19° 25' 35"	43° 13' 10"	Clone_3	07/18/2007	05/25/2015	Rio Piracicaba
4	19° 45' 15"	43° 14' 10"	Clone_3	07/18/2007	05/25/2015	Rio Piracicaba
5	20° 4' 26"	43° 23' 55"	Clone_2	06/01/2006	08/01/2013	Catas Altas
6	20° 5' 26"	43° 28' 13"	Clone_2	06/01/2006	08/01/2013	Catas Altas
7	20° 5' 32"	43° 21' 13"	Clone_2	06/01/2006	08/01/2013	Catas Altas
8	19° 11' 25"	42° 29' 43"	Clone_3	04/16/2010	05/29/2017	Belo Oriente
9	19° 3' 25"	42° 32' 39"	Clone_6	04/16/2010	02/23/2017	Açucena
10	19° 21' 56"	42° 32' 51"	Clone_4	05/12/2010	02/28/2017	Santana do Paraíso
11	19° 21' 45"	42° 31' 49"	Clone_4	05/12/2010	02/28/2017	Santana do Paraíso
12	19° 51' 39"	42° 57' 50"	Clone_7	09/29/2008	05/18/2016	São Domingos da Prata
13	19° 45' 11"	43° 1' 37"	Clone_2	04/29/2009	06/24/2015	Nova Era

2.2 Dados meteorológicos e do solo

Os dados meteorológicos (temperaturas máxima, mínima, radiação solar e precipitação) foram obtidos a partir das estações meteorológicas localizadas próximo das áreas experimentais. Os arquivos de solo para cada local foram criados usando dados de solo específicos de cada região avaliada. Uma profundidade efetiva de raiz de 4 m foi considerada para todos os locais, visto que não foi medida informações das raízes e esse é um dado de entrada do modelo.

Para estimar os parâmetros físico-hídricos do solo, foram utilizadas funções de pedotransferência - FPT's, obtendo, assim, umidades de saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, requeridos na simulação pelo modelo *APSIM Next Generation*. Utilizando a metodologia proposta por Tomasella et al. (2003), foram derivados os parâmetros para os solos da região. Os dados de entrada necessários para as funções de pedotransferência (teores de areia, silte e argila) foram obtidos por amostras de solo coletadas em cada local estudado, onde os teores de argila e areia foram quantificados pelo método densimétrico (Embrapa, 1997).

2.3 Estimativa de rendimento atingível (Ya) e potencial (Yp)

O modelo utilizado neste estudo foi o *APSIM Next Generation*, sendo devidamente calibrado e validado no capítulo 1. Nos sítios florestais utilizados (Tabela 1), foi assumido que eles foram conduzidos sob manejo florestal quase ótimo (Ya), ou seja, boa fertilização, porém sem irrigação. Para simular o crescimento potencial (Yp), aplicou-se uma irrigação automática ao longo da rotação do eucalipto, para cobrir 100% do déficit hídrico (irrigação total).

2.4 Yield Gaps do eucalipto e eficiência climática

Os resultados oriundos do modelo de simulação (Yp e Ya), juntamente com os dados de rendimento real (Yr) da empresa florestal, foram empregados para a determinação dos seguintes tipos de quebras de rendimento: total (QTOTAL); devido à deficiência hídrica (QDEF); e devido ao déficit manejo florestal (QMAN):

$$QTOTAL = Yp - Yr$$

$$QDEF = Yp - Ya$$

$$QMAN = Ya - Yr$$

$$Ec = Ya/Yp \times 100$$

$$Em = Yr/Ya \times 100$$

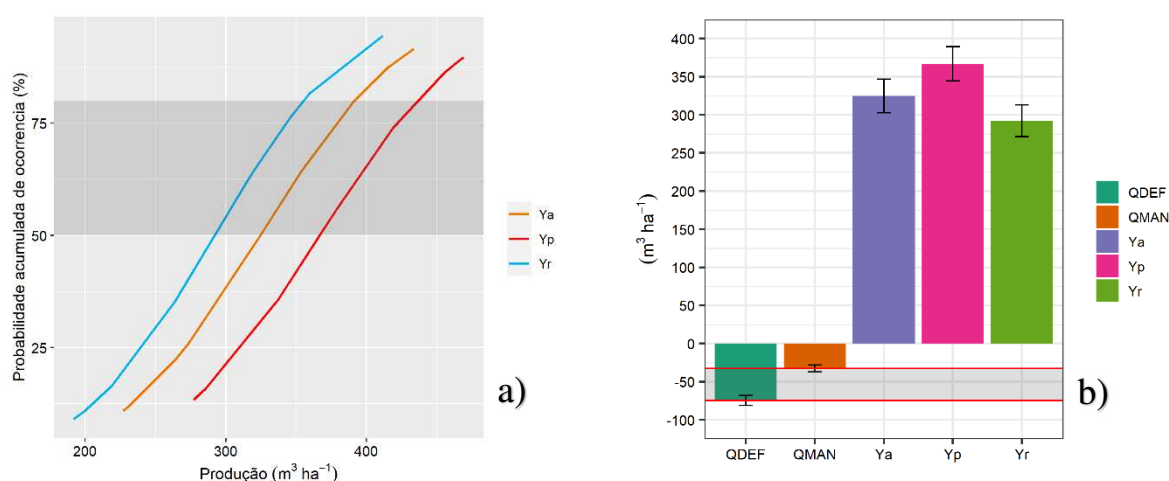
Em que: Yp é o rendimento potencial ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); Ya é o rendimento atingível ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); Yr é o rendimento real observado no campo ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); Ec é a eficiência climática; e Em é a eficiência do manejo.

3 RESULTADOS

3.1 Rendimento do eucalipto e gaps relacionado ao manejo e estresse hídrico

Uma grande variabilidade de rendimento do eucalipto foi observada em todas as localidades avaliadas (Figura 2). Em 50% delas, o rendimento potencial foi superior a $367 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, enquanto o rendimento atingível e real excedeu 325 e $293 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente (Figura 2a). A produção média geral obtida pelo Y_p , Y_a e Y_r foram respectivamente 366 , 324 e $292 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 2b). Os *gap*'s nos revelaram que a quebra maior obtida, levando em conta todos os sítios florestais, foi de QDEF, com $74.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, enquanto o QMAN foi de $32.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, equivalentes a 69.7 e 30.3% da quebra total, respectivamente.

Figura 2 – Probabilidade acumulativa de ocorrência de produção real (Y_r), atingível (Y_a) e potencial (Y_p) de *Eucalyptus* (a), produção média (Y_r , Y_a e Y_p) e quebra de rendimento, relacionadas ao manejo (QMAN) e à água (QDEF) (b) de 13 localidades produtoras no estado de Minas Gerais, Brasil. As linhas sombreadas horizontais representam limiares de 50 e 80% da probabilidade cumulativa de ocorrência (a) e a diferença entre a quebra por deficiência hídrica e por manejo (b)



3.2 Magnitudes de crescimento, *gap*'s de crescimento e eficiências climática e de manejo do eucalipto em duas épocas de avaliação

Altas eficiências climáticas e de manejo foram observadas nas regiões avaliadas (Tabela 2). A eficiência de manejo teve média de 89.7% , exibindo uma amplitude de variação de 82.9% a 97.9% . Já a eficiência climática apresentou valores variando de 81.1% e 94.6 , com média de 88.1% .

Tabela 2 – Rendimentos potencial (Yp), atingível (Ya) e real (Yr), quebras absolutas de rendimento devido ao déficit hídrico (QDEF), manejo (QMAN) e total (QTOTAL), eficiências de clima (Ec) e manejo (Em), nos 13 sítios produtores do estado de Minas Gerais

Sítio	idade	Yp	Ya	Yr	QDEF	QMAN	QTOTAL	Ec	Em
		-----m ³ ha ⁻¹ -----						-----%-----	
1	8.8	466.1	416.1	360.3	105.8	55.8	161.6	89.3	86.6
2	8.8	467.7	416.2	360.3	107.4	55.9	163.3	89.0	86.6
3	7.9	455.3	393.1	358.9	96.4	34.2	130.6	86.3	91.3
4	7.9	369.2	324.2	310	59.2	14.2	73.4	87.8	95.6
5	7.2	283.9	263.7	218.7	65.2	45.0	110.2	92.9	82.9
6	7.2	469.3	433.7	411.7	57.6	22.0	79.6	92.4	94.9
7	7.2	379.7	353.5	319.8	59.9	33.7	93.6	93.1	90.5
8	7.1	336.9	273.3	265	71.9	8.3	80.2	81.1	97.0
9	7.0	282.3	232.1	199.4	82.9	32.7	115.6	82.2	85.9
10	6.2	277.2	227.0	191.8	85.4	35.2	120.6	81.9	84.5
11	6.2	277.2	227.0	191.8	85.4	35.2	120.6	81.9	84.5
12	7.7	418.9	390.4	345.8	73.1	44.6	117.7	93.2	88.6
13	6.2	285.2	269.8	264.0	21.2	5.8	27.0	94.6	97.9
Média	7.3	366.8	324.6	292.1	74.7	32.5	107.2	88.1	89.7
CV (%)	7.3	21.2	23.5	24.7	30.0	47.9	33.2	5.5	5.5

A média da eficiência de manejo (7.3 anos) dos sítios avaliados foi de 89.7%, variando de 82.9% a 97.9% para os respectivos municípios Catas Altas (sítio 5), e Nova Era (sítio 13), ambos com o Clone_2 (Tabela 2, Figura 3b). Altas eficiências climáticas também são observadas, com uma média de 88.1% no período de corte (Tabela 2, Figura 3a). A menor Ec foi observada no município de Belo Oriente (sítio 8), com valor de 81.1%, enquanto que a maior Ec foi observada no em Nova Era (sítio 13).

O rendimento potencial médio do eucalipto considerando todas as localidades avaliadas no período de corte (7.3 anos), foi de 366.8 m³ ha⁻¹, e variou de 277.2 a 469.3 m³ ha⁻¹ (Figura 4a). O maior rendimento potencial (469.3 m³ ha⁻¹) foi encontrado no sítio florestal 6 (Catas Altas), com o Clone_2. Por outro lado, valores mais baixos de crescimento potencial (≤ 280 m³ ha⁻¹) no período de corte foram obtidos nos sítios 10 e 11.

Figura 3 – Eficiências climáticas (Ec – a) e manejo florestal (Em – b) do eucalipto para 13 localidades produtoras em Minas Gerais, Brasil, com média de 7.3 anos

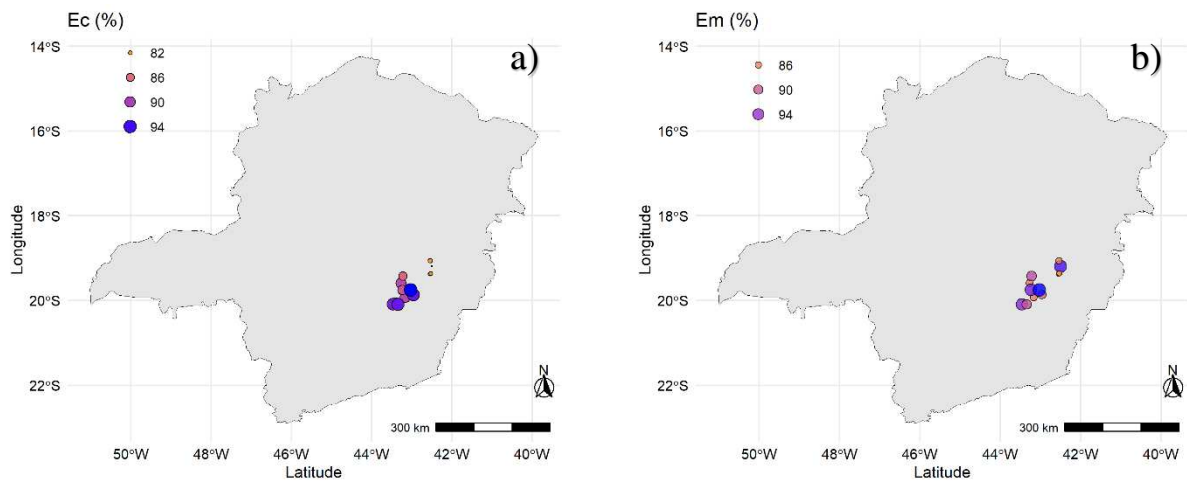
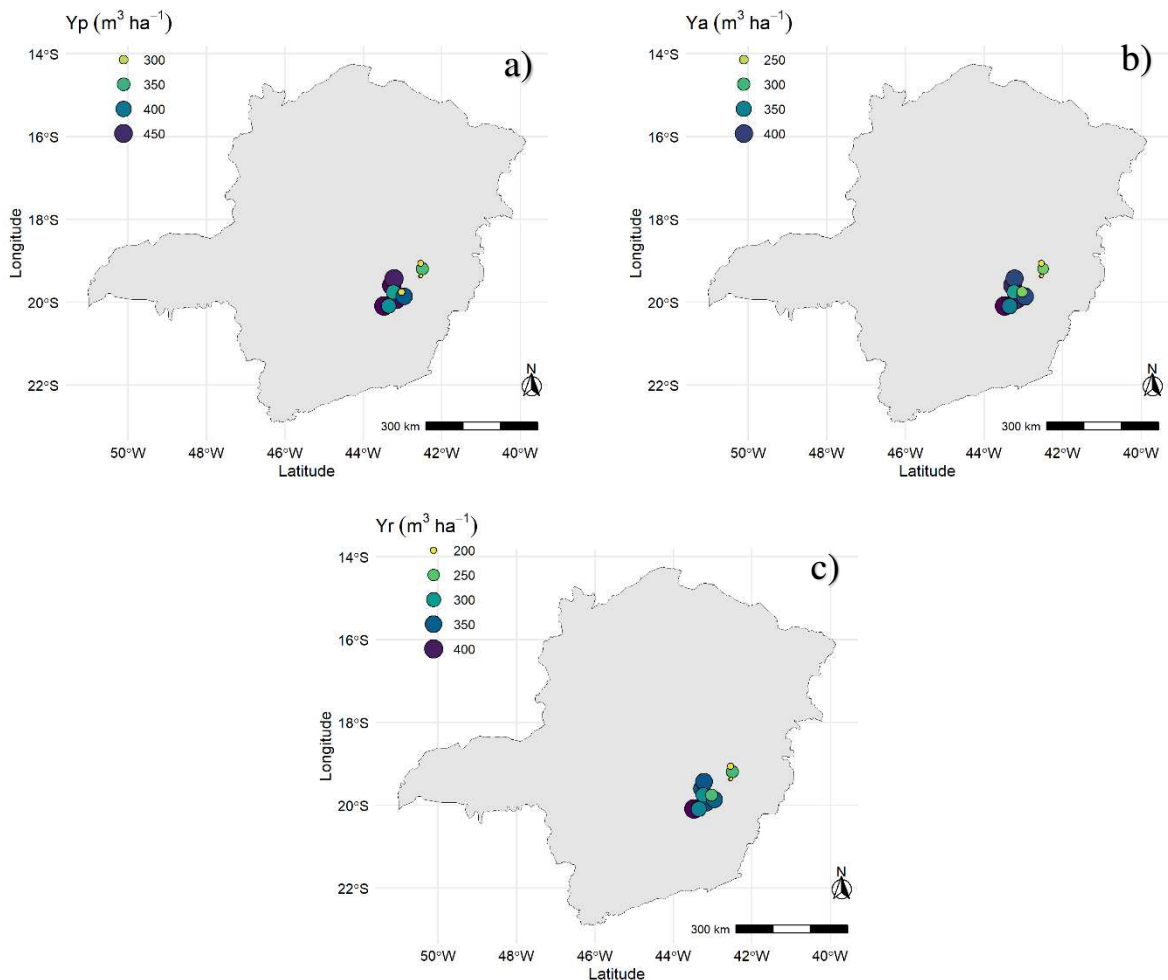


Figura 4 – Média dos rendimentos potenciais (Yp – a), atingíveis (Yr – b) e reais (Yr – c) do eucalipto simulado pelo APSIM em 13 localidades produtoras em Minas Gerais, Brasil, com média de 7.3 anos

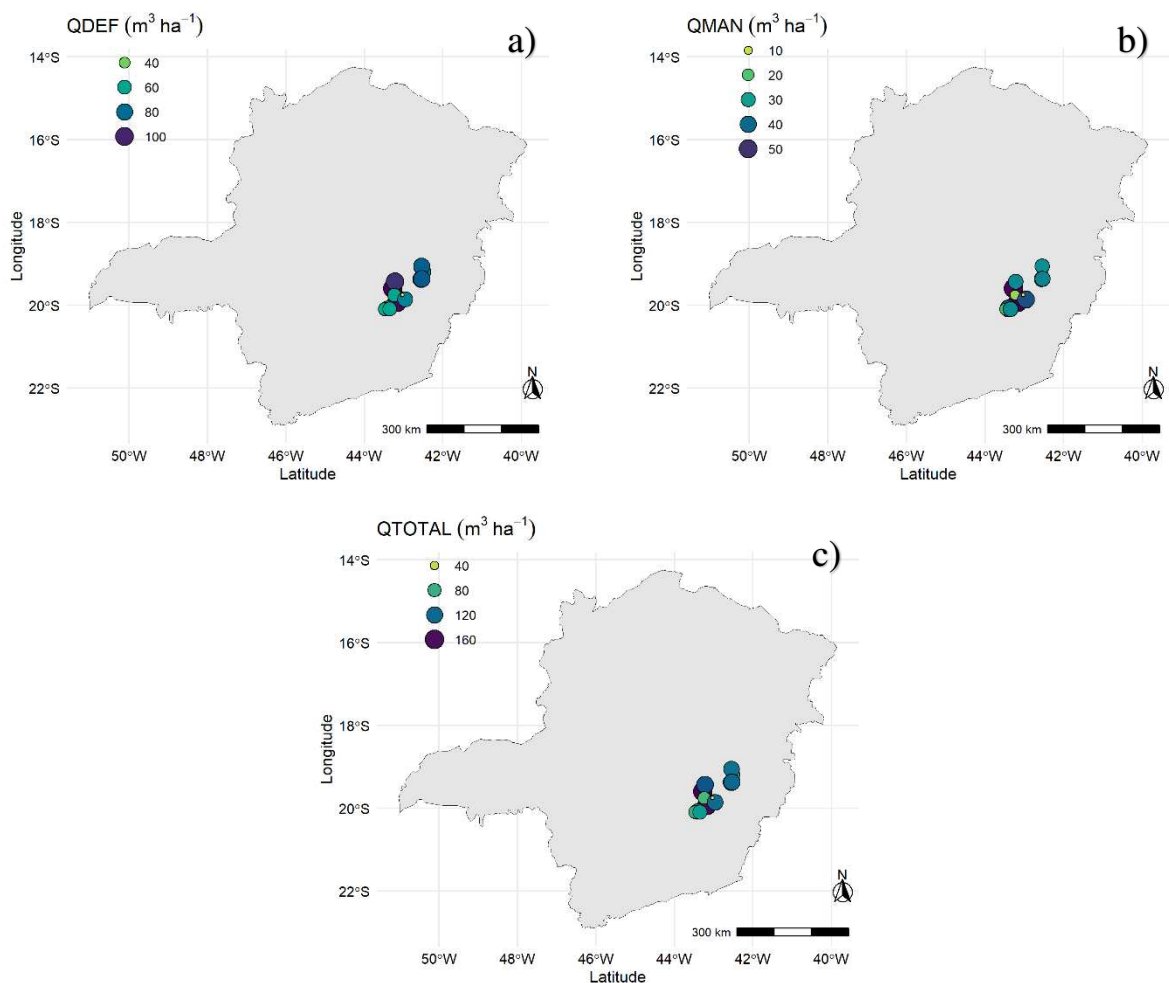


O rendimento atingível variou de 227.0 a 433.7 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ (Figura 4b). O maior rendimento atingível (433.7 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) foi encontrado no sítio florestal 6 (Catas Altas), com o Clone_2. Por outro lado, valores de rendimento atingíveis mais baixos ($\leq 227 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$) no período de corte foram obtidos nos sítios 10 e 11, ambos com o Clone_4.

O rendimento real médio do eucalipto aos 7.3 anos foi de 292.1 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ (Tabela 2), com uma variação de 191.8 a 411.7 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ (Figura 4c). O maior rendimento real (411.7 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) foi encontrado no sítio florestal 6 (Catas Altas), com o Clone_2. Por outro lado, valores de rendimento real mais baixos ($\leq 200 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$) foram obtidos nos sítios 9, 10 e 11.

A quebra de rendimento média por déficit hídrico foi de 74.7 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, variando entre 21.2 a 107.4 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ (Tabela 2, Figura 5a). Maiores QDEF ($\geq 90 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$) foram encontrados nos sítios 1, 2, 3, enquanto os menores valores ($\leq 58 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$) foram encontrados nos sítios 7 e 13.

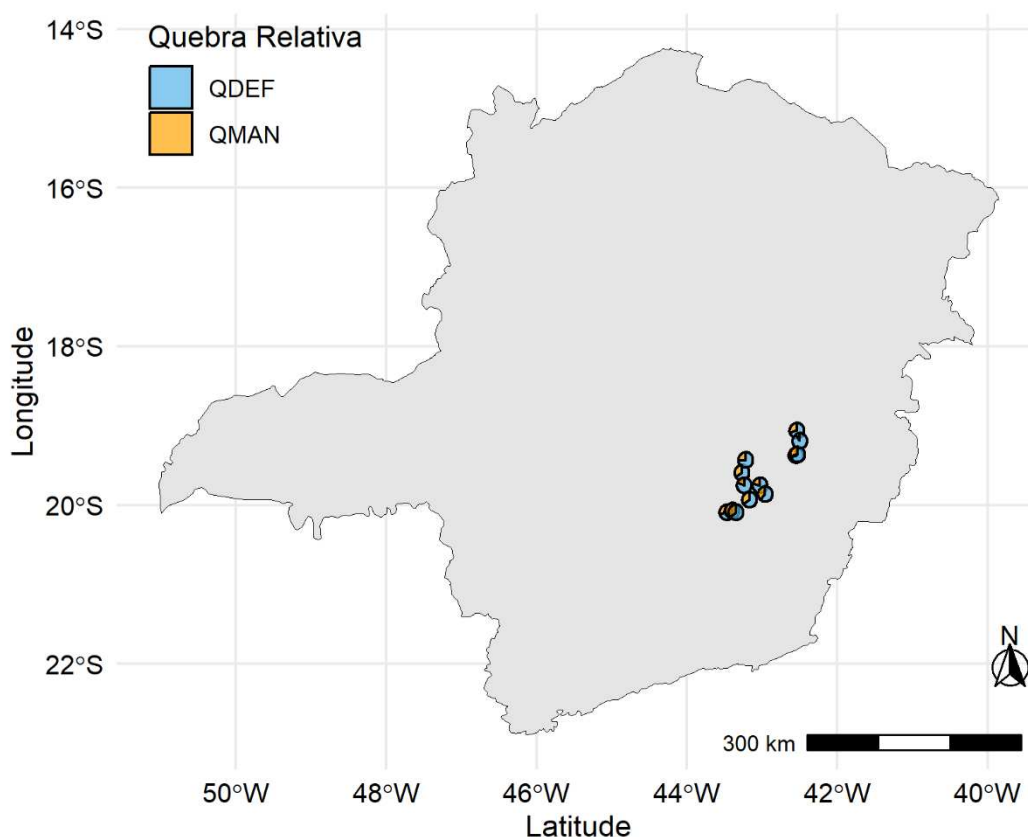
Figura 5 – Quebra de rendimento por déficit hídrico (QDEF – a), manejo (QMAN – b) e total (QTOTAL – c) do eucalipto simulado pelo APSIM em 13 localidades produtoras em Minas gerais, Brasil, com média de 7.3 anos



Ao avaliar o QMAN, é notório que houve uma variação de 5.8 a 55.9 m³ ha⁻¹, com uma média de 32.5 m³ ha⁻¹ (Tabela 2, Figura 5b). Maiores QMAN (≥ 44 m³ ha⁻¹) foram encontradas nos sítios florestais 1, 2 e 12. Por outro lado, menores valores (≤ 10 m³ ha⁻¹) foram observados nos sítios 8 e 13. O QTOTAL apresentou uma média de 107.1 m³ ha⁻¹, variando entre 27 a 163 m³ ha⁻¹ (Tabela 2, Figura 5c).

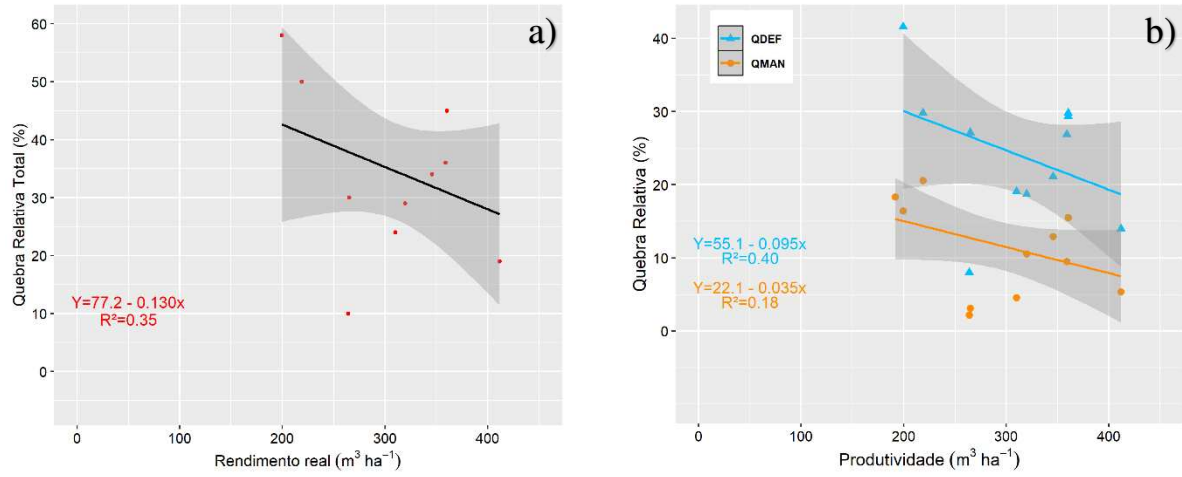
As quebras de produtividade relativa dos 13 sítios são apresentadas na Figura 6. As quebras relativas mostram que, a principal quebra de rendimento está atrelada ao déficit hídrico (QDEF), com 69.7% do total da quebra, enquanto que 30.3% está relacionada ao manejo inadequado (QMAN).

Figura 6 – Quebras relativas de crescimento do eucalipto, causadas por déficit hídrico (QDEF) e manejo florestal (QMAN), para 13 localidades produtoras no estado de Minas Gerais, Brasil, com média de 7.3 anos



Houve uma relação negativa entre o tamanho das quebras de rendimento relativa e o rendimento real (Figura 7). Quando avaliado a quebra total relativa, houve ajuste da regressão com $R^2 > 0.35$ (Figura 7a). Todavia, quando avaliado as quebras de produções relativas individuais (Figura 7b), ou seja, referente a água (QDEF) e ao manejo (QMAN), um melhor ajuste foi observado pelo QDEF, acompanhado por uma reta mais íngreme pela regressão.

Figura 7 – Relações entre a quebra relativa total (QR – a), quebra relativa por deficiência hídrica e quebra relativa pelo manejo (QDEF, QMAN – b) com o rendimento real do eucalipto para 13 localidades produtoras no estado de Minas Gerais, Brasil



4 DISCUSSÃO

O rendimento potencial (Y_p) apresentou menor variabilidade nas diferentes localidades, seguida do rendimento atingível (Y_a) e, por último, o rendimento real (Y_r) no período de corte (Tabela 2). Isso ocorre devido à redução/eliminação dos fatores limitantes relacionados à produção, por exemplo, o déficit hídrico e nutricional. Portanto, regiões com alta produtividade tendem a reduzir as flutuações de rendimento das culturas. Considerando que os 13 sítios avaliados estão localizados em diferentes regiões do estado de Minas Gerais, suas condições edafoclimáticas também são distintas, o que afeta diretamente os níveis da floresta Y_p , Y_a e Y_r (Ryan et al. 2010; Binkley et al. 2017; Elli al. 2020; Freitas et al., 2021).

Houve grande variação entre as quebras de rendimento nos sítios avaliados, dentro do estado de Minas Gerais (Figura 5c). Os maiores valores de quebra de rendimento absoluto (QTOTAL, $m^3 ha^{-1}$) foram encontrados nos municípios de Rio Piracicaba (sítios 1 e 2) (Tabela 2). Já as menores quebras totais foram encontradas nos sítios 4, 6 e 13, justificados por altos valores de eficiências climáticas (87.8, 93.1 e 94.6%, respectivamente) e de manejo (95.6, 90.5 e 97.9%, respectivamente), como observado na Figura 3. As altas eficiências climáticas e de manejo observadas nestes sítios são indicativos de uma adaptação bem-sucedida às condições locais, possibilitando a maximização do rendimento das culturas. Esses resultados ressaltam a importância de estratégias de manejo adaptadas às condições locais, bem como a necessidade de monitoramento contínuo das condições edafoclimáticas para otimizar as práticas agrícolas e minimizar as quebras de rendimento.

Apesar das localizações entre os sítios florestais não serem muito distantes no nível de macro escala, temos a ação da meso escala, como a exposição à radiação e a altitude, que variou de uma região para outra e, conseqüentemente, agindo diretamente na produção florestal. Diferenças de altitude podem caracterizar diferenças nos fatores climáticos, em particular temperatura e precipitação (Ginbo, 2022). De um modo geral, a temperatura do ar diminui com o aumento da altitude (Zhang, et al., 2021). Os autores Freitas et al. (2021) observaram diferentes níveis de deficiência e excedente hídrico em vários sítios florestais localizados em Minas Gerais, em regiões próximas (Freitas et al., 2021).

A análise detalhada das quebras de rendimento, especialmente relacionada ao déficit hídrico (QDEF), revela insights cruciais para o manejo florestal sustentável. A predominância do QDEF como fator limitante nas quebras de produtividade, indica uma vulnerabilidade significativa das florestas de eucalipto às variações climáticas, especialmente à disponibilidade de água (Tabela 2, Figura 6). As quebras médias de rendimento atingiram

74.7 m³ ha⁻¹ para o déficit hídrico e 32.5 m³ ha⁻¹ para o manejo subótimo. Isso sugere que estratégias de manejo hídrico, como a escolha de espécies mais tolerantes à seca, o ajuste no espaçamento de plantio para reduzir a competição por água ou a implementação de práticas de conservação de água, podem ser cruciais para mitigar os impactos do déficit hídrico.

Apesar da porcentagem de quebra de produtividade do eucalipto pelo QMAN ter sido menor que o QDEF, existem práticas silviculturais que podem minimizar essas quebras, como observado por Freitas et al. (2021). Dentre essas práticas, temos o preparo do solo e fertilização adequado, manejo de plantas daninhas bem como o controle de pragas e doenças. Outros autores também encontraram quebras por deficiência hídrica maiores que quebras por manejo, como Sentelhas et al. (2015), para a cultura da soja, apresentando respectivamente 74% e 26% para QDEF e QMAN.

Também podemos observar pela Figura 7 que quanto maior o rendimento florestal menor a quebra de produção, ou seja, os sítios florestais com alto rendimento de madeira neste estudo já estavam próximos de sua Y_p . Além disso, pelo grau de inclinação na Figura 7b, é possível comprovar que o QDEF apresenta uma magnitude de perda maior que o QMAN. Uma estratégia eficaz para contornar o principal *Gap* deste estudo seria a utilização de genótipos mais tolerantes à seca, com reduzido índice de área foliar e raízes mais profundas, como mencionado por Elli et al. (2019). A quebra de rendimento estimada para o eucalipto, juntamente com as principais características identificadas, deve motivar os cientistas da área de melhoramento genético para desenvolver melhores genótipos, reduzindo o *gap* por deficiência hídrica, principalmente com as incertezas que poderão surgir frente às mudanças climáticas futuras.

5 CONCLUSÃO

Nos sítios florestais avaliados, a deficiência hídrica foi o principal fator limitante das perdas de rendimento, correspondendo a 69.7% da quebra total. Isso indica que é necessário clones mais tolerantes a seca, acompanhado de um ajuste fino nas práticas de manejo, reduzindo as lacunas de rendimento nos sistemas agrícolas estudados.

Os *gaps* de rendimento avaliado em nível de mesoescala e microescala são fundamentais a fim de se ter estimativas mais precisas.

O modelo APSIM é uma ferramenta eficaz para avaliar os *gaps* de crescimento do eucalipto.

6 REFERÊNCIAS

- Agus, F., Andrade, J. F., Edreira, J. I. R., Deng, N., Purwantomo, D. K., Agustiani, N., ... & Grassini, P. Yield gaps in intensive rice-maize cropping sequences in the humid tropics of Indonesia. **Field Crops Research**, v. 237, p. 12-22, 2019.
- Bazkiaee, P. A., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H., Rezaei, M., & López-Bernal, A. The rice yield gap estimation using integrated system approaches: a case study—Guilan province, Iran. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-14, 2022.
- Binkley, D., Campoe, O. C., Alvares, C., Carneiro, R. L., Cegatta, Í., & Stape, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, 2017.
- Cheng, S. S., Huang, C. G., Chen, Y. J., Yu, J. J., Chen, W. J., & Chang, S. T. Chemical compositions and larvicidal activities of leaf essential oils from two eucalyptus species. **Bioresource technology**, v. 100, n. 1, p. 452-456, 2009.
- Elli, E. F., Sentelhas, P. C., de Freitas, C. H., Carneiro, R. L., & Alvares, C. A. Assessing the growth gaps of Eucalyptus plantations in Brazil—Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, p. 117464, 2019.
- Elli, E. F., Sentelhas, P. C., Huth, N., Carneiro, R. L., & Alvares, C. A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: a process-based modelling approach. **Ecological Indicators**, v. 114, p. 106325, 2020.
- Embrapa. Manual de Métodos de Análise de Solos (em português). **Embrapa**, Rio de Janeiro, Brazil (1997), p. 212p.
- Evans, L. T. (1993). Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge university press. Cambridge, UK: **Cambridge University Press**.
- Freitas, C. H., Elli, E. F., & Sentelhas, P. C. On-farm assessment of eucalypt yield gaps—a case study for the producing areas of the state of Minas Gerais, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, n. 10, p. 1659-1673, 2021.
- Ginbo, T. Heterogeneous impacts of climate change on crop yields across altitudes in Ethiopia. **Climatic Change**, v. 170, n. 1-2, p. 12, 2022.
- Hoogar, R., Malakannavar, S., & Sujatha, H. T. Impact of eucalyptus plantations on ground water and soil ecosystem in dry regions. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 4, p. 2929-2933, 2019.
- Ibá Relatório Indústria Brasileira de Árvores 2022. pp. 1–80. Disponível online: <https://iba.org/publicacoes> (acesso em 11 de janeiro 2023).
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual review of environment and resources**, v. 34, p. 179-204, 2009.

Mengistu, B., Amayu, F., Bekele, W., & Dibaba, Z. Effects of Eucalyptus species plantations and crop land on selected soil properties. **Geology, Ecology, and Landscapes**, v. 6, n. 4, p. 277-285, 2022.

Nabais, C., Hansen, J. K., David-Schwartz, R., Klisz, M., Lopez, R., & Rozenberg, P. The effect of climate on wood density: what provenance trials tell us?. **Forest Ecology and Management**, v. 408, p. 148-156, 2018.

Paula, I. D., Guerta, A. C., & Martinez, R. M. Comparison of eucalypt, pine, and sugarcane cellulose fibers used for paper production. **Revista Árvore**, v. 43, 2020.

Rizzo, G., Monzon, J. P., & Ernst, O. Cropping system-imposed yield gap: Proof of concept on soybean cropping systems in Uruguay. **Field Crops Research**, v. 260, p. 107944, 2021.

Rocha, S. M. G., Vidaurre, G. B., Pezzopane, J. E. M., Almeida, M. N. F., Carneiro, R. L., Campoe, O. C., ... & Figura, M. A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, p. 118290, 2020.

Ryan, M. G., Stape, J. L., Binkley, D., Fonseca, S., Loos, R. A., Takahashi, E. N., ... & Silva, G. G. Factors controlling Eucalyptus productivity: how water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010.

Salehi, B., Sharifi-Rad, J., Quispe, C., Llaique, H., Villalobos, M., Smeriglio, A., ... & Martins, N. Insights into Eucalyptus genus chemical constituents, biological activities and health-promoting effects. **Trends in Food Science & Technology**, v. 91, p. 609-624, 2019.

Santos, I. D. S. D., Martins, M. A., Pereira, E. G., & Carneiro, A. D. C. O. Physical and thermal properties of eucalyptus wood charcoal. **Cerne**, v. 26, p. 109-117, 2020.

Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., & Nendel, C. The soybean yield gap in Brazil—magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The journal of agricultural science**, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, 2015.

Stuart, A. M., Pame, A. R. P., Silva, J. V., Dikitanan, R. C., Rutsaert, P., Malabayabas, A. J. B., ... & Singleton, G. R. Yield gaps in rice-based farming systems: Insights from local studies and prospects for future analysis. **Field crops research**, v. 194, p. 43-56, 2016.

Thavamanikumar, S., Arnold, R. J., Luo, J., & Thumma, B. R. Genomic studies reveal substantial dominant effects and improved genomic predictions in an open-pollinated breeding population of Eucalyptus pellita. G3: Genes, Genomes, **Genetics**, v. 10, n. 10, p. 3751-3763, 2020.

Van Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field crops research**, v. 52, n. 3, p. 197-208, 1997.

Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Titttonell, P., & Hochman, Z. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4-17, 2013.

Woittiez, L. S., Van Wijk, M. T., Slingerland, M., Van Noordwijk, M., & Giller, K. E. Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. **European Journal of Agronomy**, v. 83, p. 57-77, 2017.

Yu, D., Hu, S., Tong, L., Xia, C., & Ran, P. Dynamics and determinants of the grain yield gap in major grain-producing areas: A case study in Hunan Province, China. **Foods**, v. 11, n. 8, p. 1122, 2022.

Yuan, S., Stuart, A. M., Laborte, A. G., Rattalino Edreira, J. I., Dobermann, A., Kien, L. V. N., ... & Grassini, P. Southeast Asia must narrow down the yield gap to continue to be a major rice bowl. **Nature Food**, v. 3, n. 3, p. 217-226, 2022.

Zhang, S., Wang, H., Sun, X., Fan, J., Zhang, F., Zheng, J., & Li, Y. Effects of farming practices on yield and crop water productivity of wheat, maize and potato in China: A meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106444, 2021.

ARTIGO III

SENSIBILIDADE DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO 3-PG E APSIM PARA EUCALIPTO EM CENÁRIOS CONTRASTANTES DE SOLO

RESUMO

Os modelos de crescimento das culturas têm muitas incertezas que afetam a resposta do rendimento às mudanças no módulo solo, composto por características intrínsecas de cada modelo. Os modelos de crescimento de culturas APSIM e 3-PG foram empregados nesta pesquisa para avaliar a sensibilidade da produtividade do eucalipto em quatro municípios de Minas Gerais, Brasil, às mudanças sistemáticas na classe de solo, pH e disponibilidade de água no solo. O principal objetivo desse estudo foi analisar como esses modelos reagem a diferentes cenários de solo e, assim, estimar a produtividade alcançável da cultura do eucalipto. As simulações foram realizadas considerando mudanças de classe de solos (arenoso, textura média e argiloso), sendo que cada classe foi composta por uma disponibilidade de água no solo, que variou de 150 a 350 mm. Para as simulações, foi utilizada uma série histórica que variou de 1961 a 2016, totalizando 8 rotações do eucalipto para cada condição de classe de solo, água e pH do solo. Os modelos de cultivo tiveram o mesmo padrão de resposta para a água no solo, com o aumento da produtividade atingível com o aumento da água disponível no solo em todas as regiões avaliadas. Houve uma maior sensibilidade do modelo APSIM em comparação ao 3-PG para todas as características avaliadas. O APSIM teve uma variação média do rendimento de $22.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ a $42.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os respectivos CAD de 150 e 350 mm. O 3-PG apresentou uma variação média de produtividade de $23.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o CAD de 150 mm, $24.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o CAD de 225 mm e $24.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o CAD de 350 mm, sendo a redução da produtividade no CAD de 350 mm, afetado pela classe de solo (argiloso). Para a classe de solos, o modelo 3-PG apresentou maiores resultados no solo de textura média, seguido pela classe arenoso e, por último, argiloso. O mesmo não é observado para o APSIM, que foi maior no argiloso, seguido por textura média e, por último, arenoso. Para ambos os modelos seria interessante uma distribuição vertical do sistema radicular, melhorando a dinâmica de água no solo e a absorção pelas plantas.

1 INTRODUÇÃO

O eucalipto é uma cultura de grande importância, considerada a espécie florestal mais relevante do Brasil, com uma extensão plantada de 7,8 milhões de hectares (Ibá, 2019). Além disso, globalmente, é uma das principais espécies florestais, com mais de 20 milhões de hectares cultivados (Brancalion et al., 2020).

No Brasil, a produtividade do eucalipto é influenciada, principalmente, pelas condições do solo e clima, sendo a disponibilidade de água o fator que mais afeta as variações na produtividade (Elli et al., 2019). Portanto, é necessário empregar técnicas que maximizem a eficiência do uso da água no solo, seja por meio do manejo adequado do solo ou através da utilização de materiais genéticos tolerantes à seca.

As práticas de manejo cultural são estratégias-chave nos sistemas agrícolas para aumentar a resiliência das culturas diante da variabilidade e das mudanças climáticas (Battisti et al., 2018). Uma forma de avaliar e validar o sucesso dessas práticas é por meio de modelos de simulação de cultivo. Esses modelos consideram as interações entre genótipo, clima, solo e manejo (Battisti et al., 2018), permitindo reduzir o tempo e os esforços exigidos em estudos de campo.

Os modelos de simulação de culturas têm sido amplamente utilizados para avaliar a umidade do solo (Ebrahimi-Mollabashi et al., 2019; Masasi et al., 2019) e a interação solo-planta-atmosfera (Gohain et al., 2022; Zizinga et al., 2022). No entanto, é importante comparar diferentes modelos para entender suas semelhanças e diferenças, a fim de identificar possíveis limitações (Battisti et al., 2018).

Dentre as características do solo que mais impactam a produtividade, destacam-se a fertilidade, o pH, classe textural e matéria orgânica. Essas características do solo têm um impacto direto na produtividade florestal, influenciando a disponibilidade de nutrientes, a capacidade de retenção de água, a estrutura das raízes e a qualidade do ecossistema (Hugelius et al., 2013; Mosaffaei et al., 2020).

Os modelos de cultivo são altamente dependentes do balanço hídrico do solo, tornando essencial compreender a sensibilidade em relação à disponibilidade de água no solo. Além disso, compreender como os modelos respondem a diferentes cenários de disponibilidade hídrica e classe textural do solo podem ser úteis durante às tomadas de decisões, como a escolha de cultivares mais adaptadas às condições locais e a definição do manejo da irrigação e fertilização.

Na literatura são citados diversos modelos de simulação, com suas vantagens e desvantagens para determinadas aplicações. Na modelagem agrônômica de plantações de eucalipto, o modelo 3-PG - *Physiological Principles in Predicting Growth* (Landsberg; Waring, 1997) tem se destacado por sua base fisiológica, desenvolvida por relações empíricas e de base fisiológica mais complexa, a partir de medidas experimentais e cálculos de campo (Gupta e Sharma, 2019, Elli et al., 2019) . O APSIM *Next Generation Eucalyptus* (Holzworth et al., 2018) também tem sido amplamente utilizado em plantações de eucalipto pela capacidade de simular o crescimento da biomassa acima do solo do eucalipto em uma ampla gama de condições edáficas e de manejo (Valadares 2018; Smethurst et al., 2020; Elli et al., 2020b) e impactos da mudança climática na produtividade da cultura (Elli et al., 2020a).

Esses modelos têm contribuído significativamente para o entendimento e previsão do crescimento das plantações de eucalipto. O 3-PG, com sua abordagem fisiológica, permite a estimativa dinâmica do crescimento das árvores de acordo com os princípios fisiológicos subjacentes (Landsberg; Waring, 1997). Já o APSIM *Next Generation Eucalyptus*, com sua capacidade de simulação abrangente, considera uma variedade de fatores edáficos, climáticos e de manejo que influenciam o crescimento da biomassa do eucalipto (Holzworth et al., 2018).

Neste contexto, analisar a sensibilidade dos modelos pode aumentar a eficiência da calibração, deste modo, a análise de sensibilidade tem sido amplamente utilizada para melhorar simulações de modelos de cultivo (Confalonieri et al., 2010; Stella et al., 2014). Considerando a importância de entender o desempenho dos modelos sob diferentes condições hídricas no solo, e seu impacto no rendimento das culturas, avaliou-se nesse estudo a sensibilidade dos modelos 3-PG e APSIM na cultura do eucalipto e seu conjunto a mudanças sistemáticas na água do solo e classe textural (argiloso, médio e arenoso), com o objetivo de entender as diferenças entre os modelos e propor melhorias para melhor simular rendimentos das culturas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Sites e clima

Quatro locais foram selecionados com base nas regiões brasileiras produtoras de eucalipto, no sudeste do Brasil (Figura 1). Os locais selecionados foram Curvelo (18.76° S; 44.33° W; 644 metros), Bocaiúva (17.10° S; 43.62° W; 686 metros), Lagoa Grande (17.77° S; 46.26° W; 974 metros) e Belo Oriente (19.22° S; 42.28° W; 402 metros), ambos os municípios localizados em Minas Gerais, Brasil. As médias de temperatura mínima e máxima do ar, precipitação total (acumulado), umidade relativa e radiação solar de cada local durante o ciclo do eucalipto (7 anos) são apresentadas na Tabela 1 e Figura 2, considerando o período de 1961 a 2016.

Figura 1 – Localização dos municípios (sítios florestais) utilizados nesse estudo.

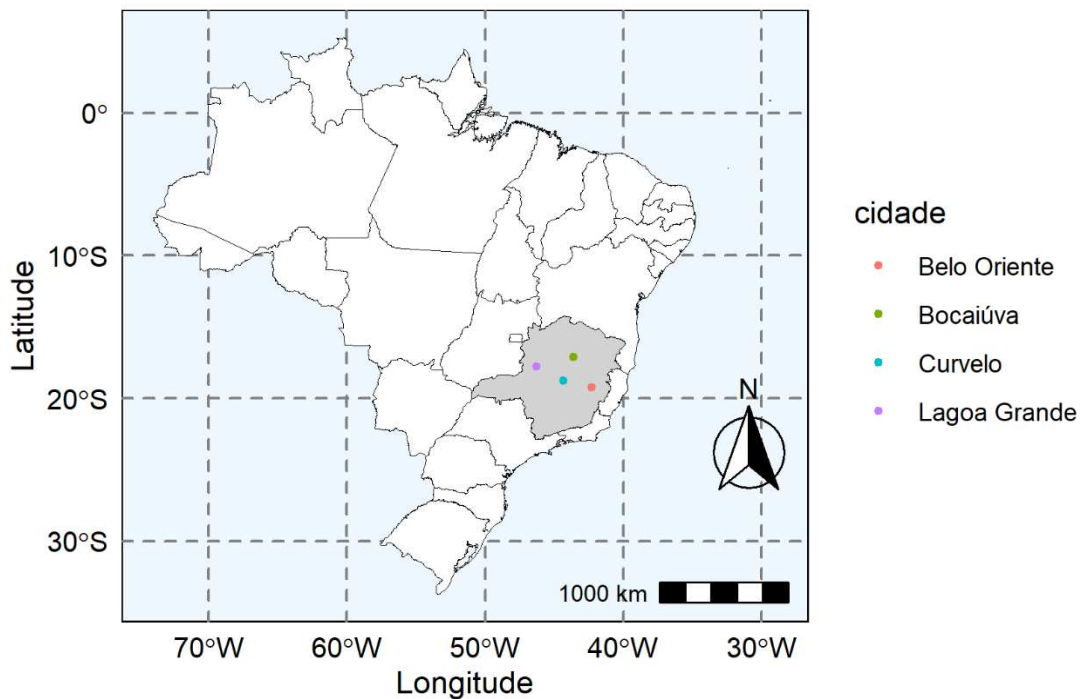
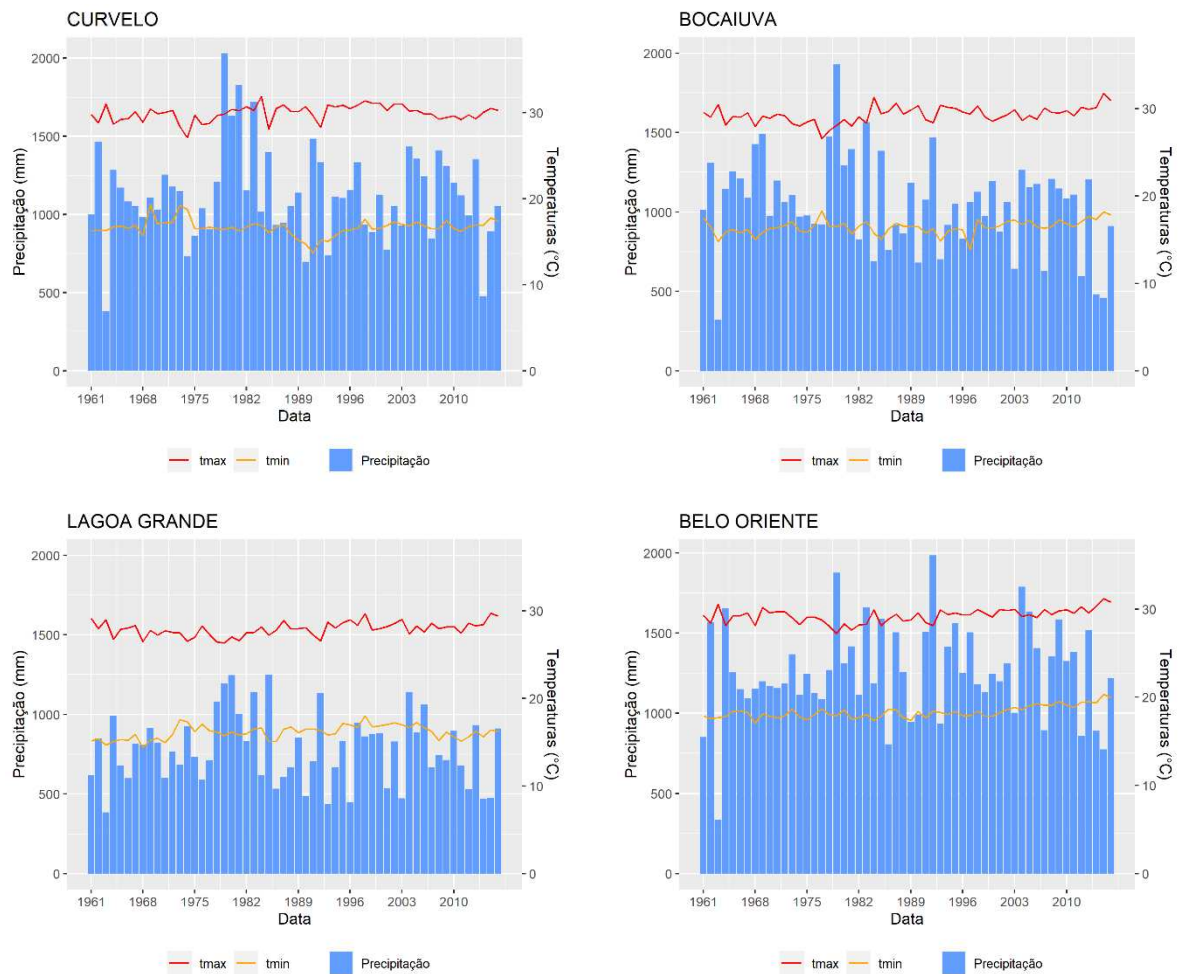


Tabela 1 – Temperaturas máxima (máx.) e mínima do ar (min.), precipitação total, umidade relativa (UR) e radiação solar média com (padrão desvio) durante o ciclo do eucalipto (7 anos) para o período de 1961 a 2016 (8 rotações) em diferentes locais de Minas Gerais, Brasil

Site	Temperatura do ar (°C)		chuva mm ciclo ⁻¹	UR %	Radiação MJ m ⁻² dia ⁻¹
	máx.	min.			
Curvelo	30.0 (±3.1)	16.7 (±3.5)	7886.7 (±761.7)	71.1 (±10.8)	17.8 (±4.8)
Bocaiúva	29.3 (±2.9)	16.5 (±3.2)	7348.4 (±847.9)	69.9 (±11.2)	18.7 (±4.7)
Lagoa Grande	27.9 (±3.0)	16.1 (±2.8)	5468.5 (±501.4)	68.6 (±10.3)	18.4 (±4.9)
Belo Oriente	29.2 (±3.1)	18.3 (±3.0)	8812.3 (±623.4)	76.9 (±8.3)	16.7 (±5.0)
Média	29.1	16.9	7378.9	71.6	17.9

Figura 2 – Variação da precipitação e das temperaturas máxima (tmax) e mínima do ar (tmin.), nos quatro sítios florestais estudados



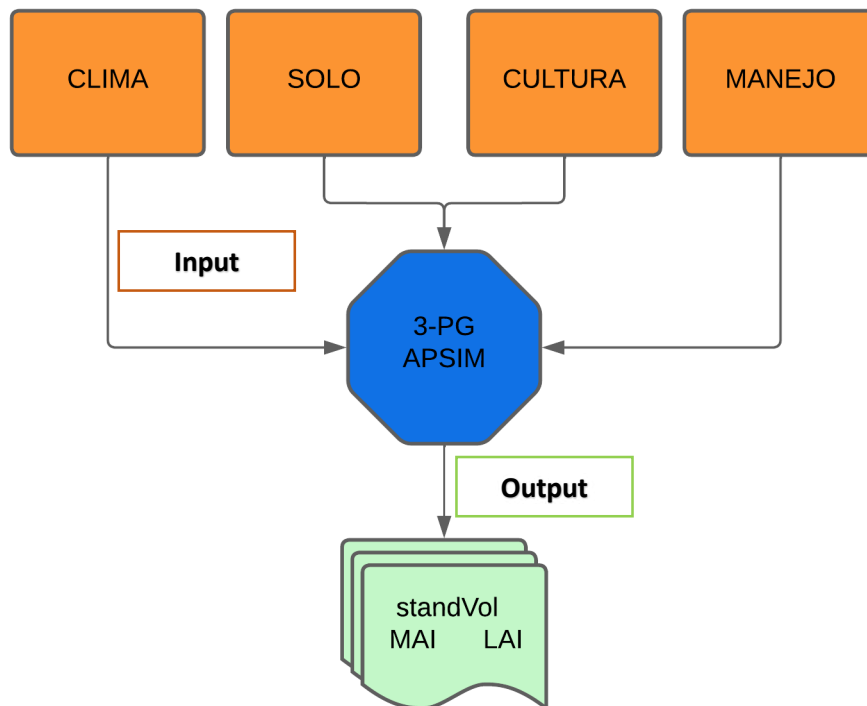
Os dados climáticos foram obtidos para o período de 1961 a 2016, totalizando 8 rotações do eucalipto para cada local. Dados meteorológicos diários em grade, com resolução espacial de $0,1 \times 0,1$ graus, foram extraídos do banco de dados desenvolvido por Xavier et al. (2016; 2022), que se baseia nas observações terrestres interpoladas de 9.259 pluviômetros e 735 estações meteorológicas.

As simulações foram realizadas usando as seguintes datas: 1961/1, 1968/1, 1975/1, 1982/1, 1989/1, 1996/1, 2003/1e 2010/1. A duração do ciclo do eucalipto foi considerada no valor de 7 anos. As simulações iniciais começaram considerando 90% do total de água disponível para a cultura em cada novo plantio, buscando reduzir o estresse hídrico e melhorar a sobrevivência do eucalipto.

2.2 Modelos de simulação APSIM e 3-PG

O crescimento e o desenvolvimento do eucalipto foram simulados por dois modelos de simulação de cultivo. A Figura 3 apresenta um fluxograma da metodologia seguida neste estudo.

Figura 3 – Fluxograma básico do funcionamento dos modelos 3-PG e APSIM



O APSIM *Next Generation* possui uma estrutura modular de sistemas de cultivo em que as informações de clima, manejo e solo podem ser inseridas uma única interface (Pasley et al., 2023). O APSIM (Holzworth et al., 2014) permite que os desenvolvedores executem simulações maiores mais rapidamente e em vários sistemas operacionais (desktop, web, móvel), podendo simular sistemas agrícolas complexos em escalas temporais e espaciais (Holzworth et al., 2018). Para simular o modelo, é necessário ter acesso a dados climáticos diários, informações sobre as características do solo e detalhes sobre as práticas de manejo da cultura. Essas informações são essenciais para obter resultados precisos e realistas na simulação. A documentação completa do modelo está disponível em <https://www.apsim.info/>.

O modelo 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*) é uma ferramenta de modelagem utilizada para simular o crescimento e desenvolvimento de plantações florestais. O modelo 3-PG é uma ferramenta de modelagem baseada em equações alométricas e uma escala de tempo mensal, que representa processos fisiológicos e ecológicos (Landsberg & Waring, 1997). Ele possui uma estrutura simples e requer poucos parâmetros de entrada para realizar as simulações (Gupta & Sharma, 2019). O modelo 3-PG é composto por modificadores de crescimento (Landsberg e Waring, 1997), que determinam, juntamente com a máxima eficiência quântica da copa, a capacidade da planta de absorver radiação fotossinteticamente ativa e produzir biomassa. Mais detalhes podem ser encontrados em Landsberg e Waring (1997) e Sands (2004).

Ambos os modelos APSIM e 3-PG foram calibrados e validados no capítulo 1, onde foi possível obter detalhes sobre o desempenho dos modelos. Informações adicionais sobre cada processo simulado e as abordagens usadas pelos modelos de cultura são mostradas no material Suplementar S2.

2.3 Sensibilidade do solo

Para avaliar a sensibilidade dos modelos em relação ao módulo solo, foram utilizadas três (3) classes de solo, sendo eles arenoso, textura média e argiloso para cada região em estudo, em cinco (5) níveis de água no solo, conforme a Tabela 2. Os valores de água no solo, bem como as características físico-hídricas de cada tipo de solo foram utilizados de acordo com a classificação de Pereira et al. (2010), adaptado.

Tabela 2 – Valores para o conteúdo de água do solo na saturação (θ_{sat}), capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e disponibilidade total de água (DTA)

Tipo de solo	θ_{PMP}	θ_{CC}	θ_{sat}	DTA
	-----cm ³ cm ⁻³ -----			mm
arenoso	0.04	0.10	0.37	150
arenoso	0.04	0.11	0.37	175
arenoso	0.04	0.12	0.37	200
arenoso	0.04	0.13	0.37	225
arenoso	0.04	0.14	0.37	250
franco argilo siltoso (média)	0.12	0.20	0.45	200
franco argilo siltoso (média)	0.12	0.21	0.45	225
franco argilo siltoso (média)	0.12	0.22	0.45	250
franco argilo siltoso (média)	0.12	0.23	0.45	275
franco argilo siltoso (média)	0.12	0.24	0.45	300
argiloso	0.30	0.40	0.55	250
argiloso	0.30	0.41	0.55	275
argiloso	0.30	0.42	0.55	300
argiloso	0.30	0.43	0.55	325
argiloso	0.30	0.44	0.55	350

*Para o cálculo do DTA, foi considerada uma profundidade de 2.5 m.

O modelo 3-PG requiere como input somente a disponibilidade total de água e a classe do solo, como observado por Sands (2010). Todavia, o modelo APSIM requer como variáveis de solo as características mais detalhadas, como a profundidade (2.5 m foi considerado), as características físico-hídricas, teor de carbono, sendo considerado 1%, bem como o pH (5.5 foi considerado). Para demais variáveis do módulo solo nos modelos 3-PG e APSIM, foram utilizadas o *default*.

2.4 Análise de dados

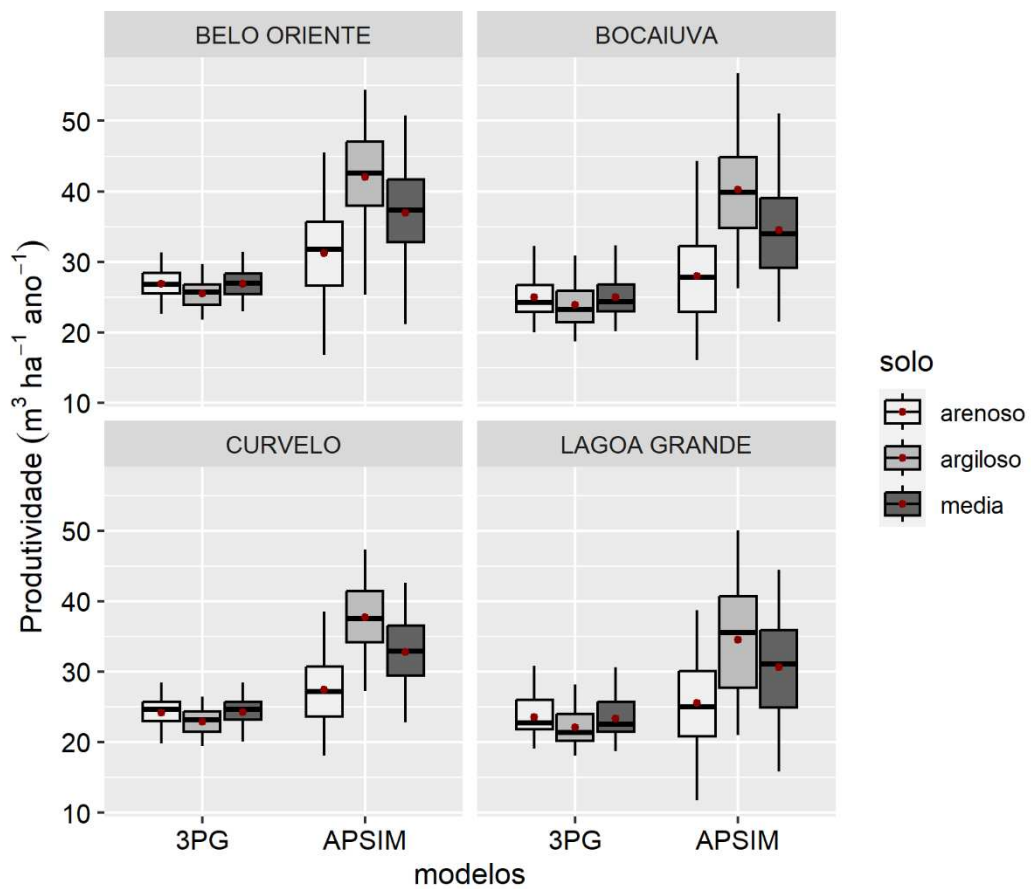
O efeito de cada cenário do solo foi avaliado com base nos rendimentos atingíveis do incremento médio anual (produtividade m³ ha⁻¹ ano⁻¹), considerando o déficit hídrico como fator limitante (Sentelhas et al. 2015). As respostas dos modelos de cultura foram computadas como resultados absolutos para cada cenário de simulação criado para o módulo solo. Neste estudo, empregou-se a estatística descritiva com o objetivo de caracterizar um conjunto de dados. Foi conduzida uma análise exploratória desses dados, utilizando o diagrama de caixa (Box-Plot) como ferramenta, com a utilização do *software* R, que é uma plataforma de código aberto.

3 RESULTADOS

3.1 Efeito da classe de solo na produtividade do eucalipto

Os modelos de cultivo apresentaram resultados distintos quanto à interferência da classe de solo na variável resposta (produtividade, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), como observado na Figura 4. O modelo APSIM apresentou maiores respostas médias produtivas para solos da classe argiloso, seguido por solo de textura média e, por último, solo arenoso. Observa-se que, em relação à resposta produtiva do 3-PG, o solo de textura média apresentou resultados ligeiramente maiores em comparação ao solo arenoso, enquanto a menor produtividade média foi observada no solo argiloso (Figura 4), isso em todos os municípios avaliados.

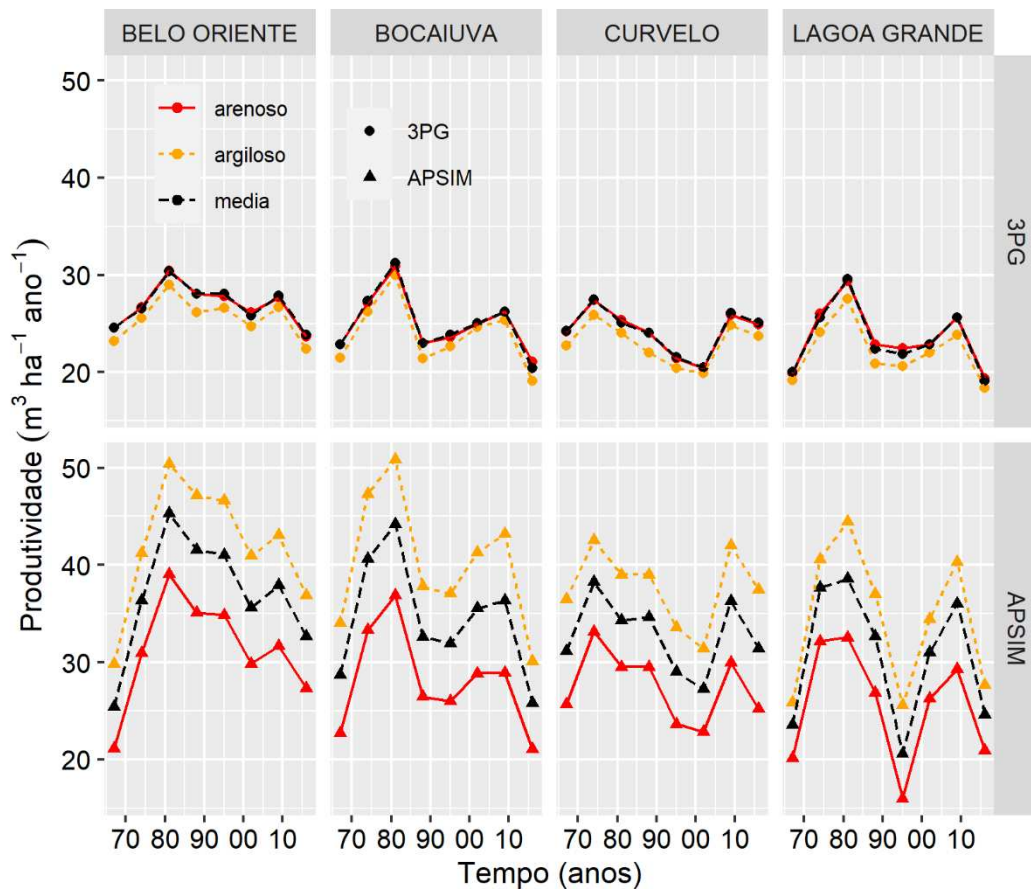
Figura 4 – Rendimento do eucalipto simulado em diferentes cenários de classes de solo por dois modelos de cultura, em Minas Gerais, Brasil (dados de quatros locais)



A análise realizada nos diferentes sítios avaliados (Figura 4) revelou que o modelo 3-PG apresentou uma baixa variabilidade em relação à textura do solo. Em contraste, o modelo APSIM demonstrou uma maior variabilidade nesse aspecto. Além disso, a média esteve sempre muito próxima da mediana, indicando uma alta simetria dos dados, exceto para o município de Lagoa Grande, que apresentou média mais distante da mediana em ambos os modelos avaliados.

Pela Figura 5, é possível identificar o padrão de resposta das produtividades ao longo do tempo. Em todos os municípios avaliados, percebe-se que houve o mesmo comportamento, no qual o rendimento obtido nos anos 1995 e 2002 foi relativamente baixo, em comparação aos outros anos, para ambos os modelos. Também se pode observar que o corte realizado no ano de 1981 teve maior rendimento para ambos os modelos.

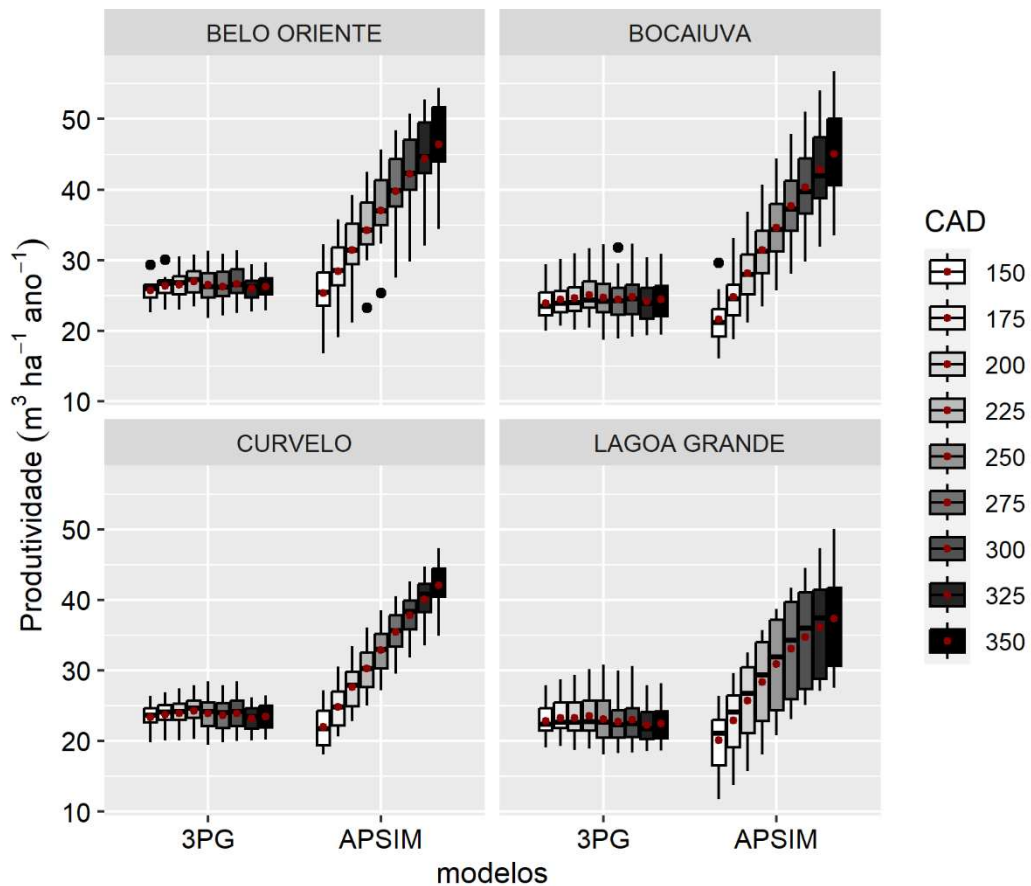
Figura 5 – Rendimento do eucalipto simulado em diferentes cenários de classes de solo por dois modelos de cultura ao longo dos anos (8 ciclos), em Minas Gerais, Brasil (dados de quatros locais)



3.2 Efeito da CAD na produtividade do eucalipto

Na Figura 6 é possível observar os diferentes níveis de água no solo, para quatro regiões com características climáticas distintas. O CAD do solo variou de 150 mm a 350 mm, sendo que para o modelo APSIM, a produtividade foi aumentando gradativamente com o aumento de água disponível no solo em todas as regiões. A produtividade média em Belo Oriente variou de 25.4 a 46.4 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para os respectivos CAD de 150 mm e 350 mm para o APSIM. Já em Lagoa Grande, os respectivos CAD de 150 mm e 350 mm apresentaram produtividades médias no modelo APSIM de 20.1 e 37.4 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente, sendo as menores produtividades registradas. Ao avaliar a média entre todas as quatro regiões, temos variações produtivas de 22.2 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para o CAD de 150 mm e 42.7 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para o CAD de 350 mm (APSIM).

Figura 6 – Rendimento do eucalipto simulado em diferentes cenários de disponibilidade de água no solo por dois modelos de cultura, em Minas Gerais, Brasil (dados de quatro locais). Foram utilizados os valores médios das três classes de solo, arenoso, média e argiloso

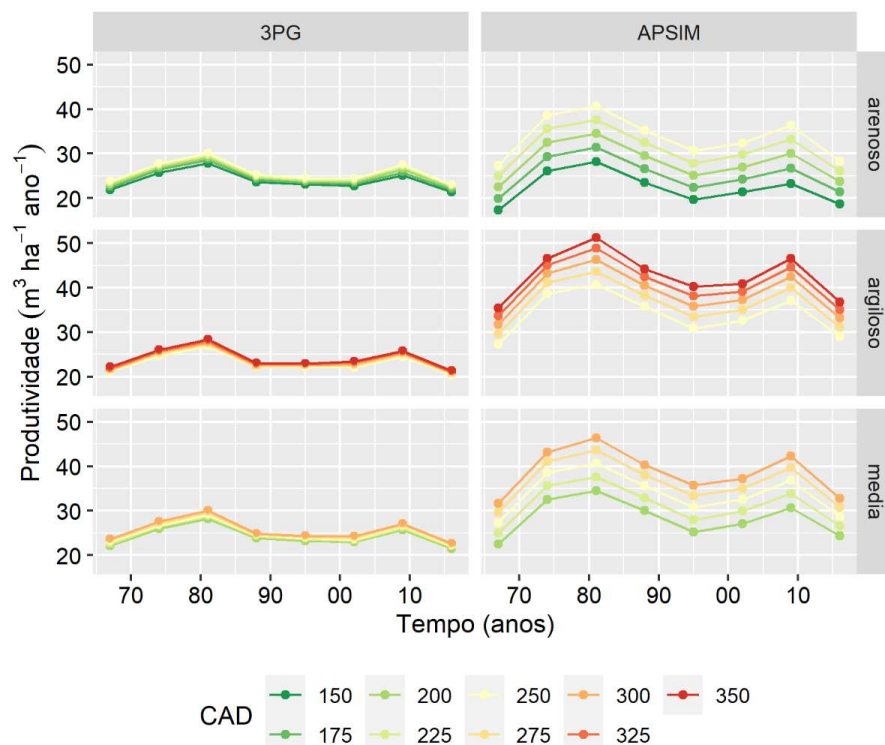


Quanto ao modelo 3-PG, é notório uma que houve uma menor influência da CAD na produtividade, mas ainda assim o aumento da CAD apresentou maior produtividade. Para Belo Oriente, por exemplo, a produtividade média variou de $25.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ com a CAD de 150 mm, para $26.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ com a CAD de 300 mm, enquanto que a CAD de 350 mm apresentou produtividade média de $26.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Ao avaliar a média entre todas as quatro regiões, temos variações produtivas de $23.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o CAD de 150 mm, $24.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o CAD de 225 mm e $24.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o CAD de 350 mm.

Parte dessa redução da produtividade na a CAD de 350 mm, em comparação com a CAD de 300 mm (modelo 3-PG), se deve a influência da classe de solo, como observado na Figura 7. Quando avaliado individualmente a CAD por classe de solo, é possível, portanto, notar que a CAD de 350 mm apresentou a maior produtividade (solo argiloso).

Observa-se que para a classe de solo arenoso, o CAD de 150 e 175 mm apresentou respostas produtivas maiores ao longo da rotação do eucalipto para o modelo 3-PG, em comparação ao APSIM (Figura 7). Todavia, $\text{CAD} > 175 \text{ mm}$ resultou em resposta produtiva maior para o APSIM na classe de solo arenoso. As demais classes de solos (média e argiloso) mantiveram-se sempre superior à resposta produtiva do eucalipto no modelo APSIM.

Figura 7 – Rendimento atingível do eucalipto simulado em diferentes cenários de disponibilidade de água no solo por dois modelos de cultura, em Minas Gerais, Brasil (dados médios de quatros locais). Foram utilizados os valores de água no solo para classes textural arenoso, média e argiloso, de acordo com Tabela 2



4 DISCUSSÃO

A resposta do rendimento do eucalipto em resposta às classes de solo foi diferente em cada modelo avaliado (Figura 4). O padrão de resposta produtiva do eucalipto pelo modelo APSIM foi maior na classe de solo argiloso, seguido por textura média e, posteriormente, arenoso. Já o modelo 3-PG obteve menor produtividade média no solo argiloso.

Isso está relacionado às diferenças intrínsecas de cada modelo. O APSIM, por exemplo, foi considerado somente o teor de água no solo obtida pela capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Portanto, as classes texturais foram determinadas somente em resposta ao teor de água no solo, sem considerar outras variáveis, por exemplo, as diferenças de carbono orgânico entre as classes texturais. Isso, portanto, contribuiu para o aumento produtivo do APSIM, visto que quanto maior a água no solo disponível para as plantas, maior o potencial produtivo delas. Como observado por Plett et al. (2020), os dois recursos com maior influência na produtividade das culturas são a água e o nitrogênio.

No modelo 3-PG, foram empregadas as informações referentes às diferentes categorias de textura do solo, ou seja, areia, franco arenoso, franco argiloso ou argiloso (Paul et al., 2007). Neste estudo, utilizou-se areia (S), franco arenoso (SL) e argiloso (C). Ao selecionar a textura do solo, o 3-PG utiliza diferentes parâmetros modificadores da água do solo, que são o *SWconst* e *SWpower* (Xie et al., 2017), e os valores para esses parâmetros diferem por classe de textura do solo (Sands, 2004). Portanto, o *SWconst* e *SWpower* foram os elementos que governaram a maior resposta produtiva do modelo 3-PG no solo franco arenoso, considerado neste estudo como textura média.

O *SWconst* é uma constante que representa a eficiência do uso da água pelo sistema florestal, e afeta, portanto, a capacidade das árvores de extrair água do solo. Valores mais baixos dessa variável indica que as árvores são menos eficientes em extrair água do solo, o que pode limitar seu crescimento, especialmente em condições de solo seco. Já o *SWpower*, é um expoente que reflete como a disponibilidade de água no solo afeta o crescimento das árvores. Um valor menor de *SWpower* significa que as árvores são menos sensíveis à disponibilidade de água no solo, e o crescimento das árvores pode ser menos afetado por variações na umidade do solo.

Ambos os modelos demonstraram o mesmo padrão de resposta produtiva ao longo dos anos, como observado na Figura 5. O terceiro plantio ocorrido em 1975 com colheita em 1981 apresentou maiores respostas produtivas em ambos os modelos. Portanto, ambos responderam de maneira parecida no que diz respeito à disponibilidade de água no solo, radiação e

temperatura. As variações foram apenas na intensidade que ambos expressaram essa produtividade, no qual o modelo APSIM foi mais sensível.

O aumento da CAD no modelo APSIM aumentou gradativamente a produtividade (Figura 6). Como mencionado anteriormente, o APSIM foi governado, principalmente, pela influência da água no solo, portanto, aumentou gradativamente sua produtividade. Houve *outliers* em Belo Oriente para o APSIM, e isso ocorreu devido à baixa produtividade encontrada no primeiro plantio (Figura 6).

Em Belo Oriente, por exemplo, a precipitação acumulada ocorrida durante o primeiro ciclo (7 anos) foi de 7905.1, todavia, no ano de 1963 houve um veranico, registrando uma precipitação anual de 334 mm (Figura 2). Além disso, essa região possui maiores temperatura média, aumentando, portanto, a demanda hídrica. Como a CAD do solo arenoso é menor, houve, portanto, uma penalização assertiva do modelo, ocasionando uma produtividade muito baixa na CAD de 225 mm sendo $\leq 23.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os autores Almeida, et al. (2007) observaram em seu estudo sobre balanço hídrico em plantio de eucalipto que uma precipitação de 634 mm é insuficiente para suprir as necessidades das árvores.

Já *outliers* em Belo Oriente, observados no modelo 3-PG, foram obtidos no ciclo com corte do eucalipto em 1981. Durante o período deste ciclo foi registrado a segunda maior precipitação acumulada ocorrida, $> 9300 \text{ mm ciclo}^{-1}$ com uma distribuição mais uniforme. Uma distribuição uniforme da precipitação entre os meses beneficia o aumento da produtividade primária bruta, produtividade líquida do ecossistema (Wang et al., 2020). Portanto, a produção de eucalipto é influenciada de forma significativa pela disponibilidade de água e pela sazonalidade das chuvas (Binkley et al., 2020; Costa et al., 2020; Soares et al., 2020).

A variabilidade ao longo dos anos para a produtividade média pode ser observada na Figura 7. É possível notar a amplitude entre as simulações realizadas pelo APSIM e pelo 3-PG, no qual o APSIM, teve uma ampla variabilidade entre as diferentes CAD utilizadas neste estudo.

De uma maneira geral, a sensibilidade do modelo APSIM foi maior que o 3-PG para as características avaliadas no módulo solo. Todavia, isso não indica que um modelo seja superior ao outro, visto que calibrações locais muitas vezes devem ser realizadas nos modelos a fim de reduzir erros. Quanto à dinâmica de água no solo e à absorção pelas plantas, é possível que uma distribuição vertical e horizontal do sistema radicular ajude a minimizar erros e melhorar os modelos de simulação, notadamente ao 3-PG, que não possui como *input* a profundidade do solo. Como observado por Lemos et al. (2023), no modelo 3-PG, a

profundidade do solo é fixa e, uma vez que a textura do solo e a capacidade de retenção de água são definidas, a disponibilidade de água no solo permanece constante. Outro ponto a ser observado é que durante as estações secas, a dinâmica do crescimento das raízes e sua interação com o nível de água no solo, juntamente com o uso de parâmetros empíricos do solo para definir a absorção de água pelas raízes, representam um aspecto restritivo nos modelos de cultivo (Palosuo et al., 2011). Portanto, melhorias na dinâmica das respostas das raízes às condições ambientais e do solo devem ser feitas (Hossain et al. 2014).

5 CONCLUSÃO

Foi observada maior sensibilidade a mudanças sistemáticas na água disponível no solo para o modelo APSIM em relação ao 3-PG.

As menores produtividades do eucalipto foram obtidas nos solos arenosos no modelo APSIM e nos solos argilosos no modelo 3-PG.

A compreensão da sensibilidade diferenciada dos modelos 3-PG e APSIM em relação a água no solo pode subsidiar estratégias de manejo mais eficazes, particularmente em regiões onde a disponibilidade de água é um fator crítico.

6 REFERÊNCIAS

- Almeida, A. C., Soares, J. V., Landsberg, J. J., & Rezende, G. D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1-2, p. 10-21, 2007.
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., & Boote, K. J. Sensitivity and requirement of improvements of four soybean crop simulation models for climate change studies in Southern Brazil. **International journal of biometeorology**, v. 62, p. 823-832, 2018.
- Binkley, D., Campoe, O. C., Alvares, C., Carneiro, R. L., Cegatta, Í., & Stape, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, 2017.
- Brancalion, P. H., Amazonas, N. T., Chazdon, R. L., van Melis, J., Rodrigues, R. R., Silva, C. C., ... & Holl, K. D. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 1, p. 55-66, 2020.
- Confalonieri, R., Bellocchi, G., Bregaglio, S., Donatelli, M., & Acutis, M. Comparison of sensitivity analysis techniques: a case study with the rice model WARM. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 16, p. 1897-1906, 2010.
- Costa, S. E., do Santos, R. C., Vidaurre, G. B., Castro, R. V. O., Rocha, S. M. G., Carneiro, R. L., ... & Trugilho, P. F. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117807, 2020.
- E., Huth, N. I., Holzworth, D. P., Ordóñez, R. A., Hatfield, J. L., Huber, I., ... & Archontoulis, S. V. Enhancing APSIM to simulate excessive moisture effects on root growth. **Field Crops Research**, v. 236, p. 58-67, 2019.
- Elli, E. F., Sentelhas, P. C., de Freitas, C. H., Carneiro, R. L., & Alvares, C. A. Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil—Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, p. 117464, 2019.
- Gohain, G. B., Singh, K. K., Singh, R. S., Dakhore, K. K., & Ghosh, K. Application of CERES-sorghum crop simulation model DSSAT v4. 7 for determining crop water stress in crop phenological stages. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 2, p. 1963-1975, 2022.
- Gupta, R., & Sharma, L. K. The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: **A review. Ecological Modelling**, v. 397, p. 55-73, 2019.
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., ... & Keating, B. A. APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 327-350, 2014.
- Holzworth, D., Huth, N. I., Fainges, J., Brown, H., Zurcher, E., Cichota, R., ... & Snow, V. APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. **Environmental Modelling & Software**, v. 103, p. 43-51, 2018.

Hossain, M. M., Liu, X., Qi, X., Lam, H. M., & Zhang, J. Differences between soybean genotypes in physiological response to sequential soil drying and rewetting. **The Crop Journal**, v. 2, n. 6, p. 366-380, 2014.

Hugelius, G., Tarnocai, C., Broll, G., Canadell, J. G., Kuhry, P., & Swanson, D. K. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions. **Earth System Science Data**, v. 5, n. 1, p. 3-13, 2013.

Indústria brasileira de árvores. Annual Report 2019. Brasília: IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores, 2019. 80p.

Landsberg, J. J., & Waring, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest ecology and management**, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.

Lemos, C. Z., Carrero, O., Hakamada, R., Silva, L. F., Ferreira, K., & Stape, J. L. 3-PG model enhancement by modifying soil water availability in a tropical Eucalyptus urophylla plantation. **Scientia Forestalis**, 51, e3917, 2023.

Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Warren, J., & Marek, G. Simulating soil water content, evapotranspiration, and yield of variably irrigated grain sorghum using AquaCrop. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 55, n. 4, p. 976-993, 2019.

Mosaffaei, Z., Jahani, A., Chahouki, M. A. Z., Goshtasb, H., Etemad, V., & Saffariha, M. Soil texture and plant degradation predictive model (STPDPM) in national parks using artificial neural network (ANN). **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 6, p. 715-729, 2020.

Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J. E., ... & Rötter, R. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. **European Journal of Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 103-114, 2011.

Pasley, H., Wenham, K., Bell, L., Huth, N., Holzworth, D., Chaki, A., ... & Collins, M. APSIM next generation mungbean model: A tool for advancing mungbean production. **Field Crops Research**, v. 298, p. 108955, 2023.

Paul, K. I., Booth, T. H., Jovanovic, T., Sands, P. J., & Morris, J. D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 243, n. 2-3, p. 237-247, 2007.

Plett, D. C., Ranathunge, K., Melino, V. J., Kuya, N., Uga, Y., & Kronzucker, H. J. The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. **Journal of experimental botany**, v. 71, n. 15, p. 4452-4468, 2020.

Relatório anual IBÁ 2022. São Paulo, 2022.

Sands, P. 3PG PJS user manual. Retrieved in April, v. 16, 2010.

SANDS, P. J. Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. **CRC Sustainable Production Forestry**, Hobart, v. 34, 2004.

Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., & Nendel, C. The soybean yield gap in Brazil—magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The journal of agricultural science**, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, 2015.

Soares, A. A., Scolforo, H. F., Forrester, D. I., Carneiro, R. L., & Campoe, O. C. Exploring the relationship between stand growth, structure and growth dominance in Eucalyptus monoclonal plantations across a continent-wide environmental gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118340, 2020.

Stella, T., Frasso, N., Negrini, G., Bregaglio, S., Cappelli, G., Acutis, M., & Confalonieri, R. Model simplification and development via reuse, sensitivity analysis and composition: a case study in crop modelling. **Environmental Modelling & Software**, v. 59, p. 44-58, 2014.

Wang, Z., He, Y., Niu, B., Wu, J., Zhang, X., Zu, J., ... & Wang, X. Sensitivity of terrestrial carbon cycle to changes in precipitation regimes. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 106223, 2020.

Xavier, A. C., King, C. W., & Scanlon, B. R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022.

Xie, Y., Wang, H., & Lei, X. Application of the 3-PG model to predict growth of *Larix olgensis* plantations in northeastern China. **Forest Ecology and Management**, v. 406, p. 208-218, 2017.

Zizinga, A., Mwanjalolo, J. G. M., Tietjen, B., Bedadi, B., Amaro de Sales, R., & Beesigamukama, D. Simulating Maize Productivity under Selected Climate Smart Agriculture Practices Using AquaCrop Model in a Sub-humid Environment. **Sustainability**, v. 14, n. 4, p. 2036, 2022.

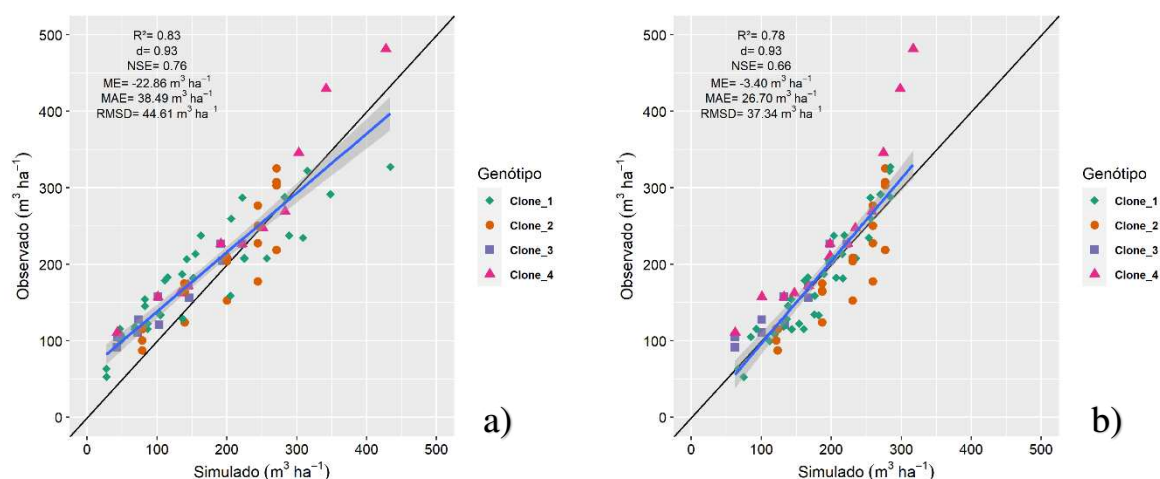
SUPLEMENTAR S2

Tabela 1 – Estatísticas de erro de previsão do modelo APSIM e 3-PG na calibração utilizando a média de quatro (4) clones distintos, submetido aos tratamentos irrigado (I), fertirrigado (FI) e sem irrigação e fertirrigação (SFI) em Santana do Paraíso, Brazil

Variável	R ²	NSE	RSR	MAE	ME	RMSD
Calibração APSIM						
Biomassa acima do solo (t ha ⁻¹)	0.96	0.95	0.21	13.1	-6.88	14.4
DAP (cm)	0.97	0.92	0.27	1.44	-0.76	1.58
IAF (m ² m ⁻²)	0.65	0.60	0.60	0.52	-0.04	0.63
Altura de planta (m)	0.93	0.21	0.85	6.62	-6.62	6.93
eafTronco (g m ⁻²)	0.96	0.89	0.32	447.5	-392.3	611.1
Calibração 3-PG						
Biomassa acima do solo (t ha ⁻¹)	0.94	0.76	0.47	25.6	-25.6	30.0
DAP (cm)	0.94	0.86	0.36	1.41	-1.34	1.74
IAF (m ² m ⁻²)	0.04	-0.80	1.28	1.04	0.12	1.23
Altura de planta (m)	0.91	0.80	0.43	3.30	-2.74	3.76
eafTronco (g m ⁻²)	0.95	0.92	0.26	457.11	341.58	609.69

R², NSE, RSR, MAE, ME e RMSD representam o coeficiente de determinação, a eficiência de Nash Sutcliffe, a raiz do erro quadrático médio para a razão de desvio padrão, o erro absoluto médio, o erro médio e desvio da raiz quadrada média, respectivamente.

Figura 5 – Validação dos modelos APSIM *Next Generation* (a) e 3-PG (b), prevendo o volume de tronco no conjunto de dados independentes para diferentes genótipos de *Eucalyptus* (Clone_1, Clone_2, Clone_3 e Clone_4) em diferentes regiões; R², NSE, d, MAE, ME e RMSD representam o coeficiente de determinação, a eficiência de Nash Sutcliffe, o índice de concordância de Willmott, o erro absoluto médio, o erro médio e desvio da raiz quadrada média, respectivamente. Linha sombreada representa o intervalo de 95% de confiança em torno da linha de regressão.



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise detalhada dos modelos de simulação APSIM e 3-PG revelou aspectos fundamentais sobre o crescimento e produtividade do eucalipto em ambientes diversos. Estes modelos provaram ser ferramentas eficazes na modelagem florestal, oferecendo insights valiosos para a otimização do manejo florestal. A pesquisa enfatizou a importância de desenvolver práticas adaptativas no manejo e clones mais resistentes à seca, devido ao impacto significativo da deficiência hídrica na produtividade. Além disso, a sensibilidade diferenciada dos modelos APSIM e 3-PG às variações de água e tipo de solo sublinha a complexidade da interação entre fatores ambientais e crescimento do eucalipto. Este estudo não apenas fornece uma base sólida para estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis, mas também abre caminhos para futuras pesquisas na área de silvicultura adaptativa.